



Universidade de Aveiro
2009

Departamento de Electrónica Telecomunicações e
Informática

**TIAGO DANIEL
DUARTE CARVALHO**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE TRACÇÃO
BASEADO EM PILHA DE COMBUSTÍVEL**



**Universidade de
Aveiro
2009**

Departamento de Electrónica
Telecomunicações e Informática

**TIAGO DANIEL
DUARTE CARVALHO**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE TRACÇÃO
BASEADO EM PILHA DE COMBUSTÍVEL**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. Manuel Bernardo Cunha, e co-orientação científica do Dr. José Luís Azevedo, Professores Auxiliares do Departamento de Electrónica Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho à minha família e namorada.

O júri

Presidente

Prof. Dr. Dinis Magalhães dos Santos

Professor catedrático do Departamento de Engenharia Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. António Paulo Moreira

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Dr. Manuel Bernardo Cunha

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. José Luís Azevedo

Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Gostaria de expressar um profundo agradecimento quer ao meu orientador, Prof. Dr. Manuel Bernardo Cunha, quer ao meu co-orientador, Prof. Dr. José Luís Azevedo pela ajuda prestada, assim como a transmissão de conhecimentos efectuada.

Por outro lado, gostaria de agradecer o companheirismo revelado pelos colegas da sala 317.

Gostaria, por fim, de transmitir um sinal de reconhecimento à minha família e amigos, por toda a compreensão e apoio prestados.

Palavras-chave

Pilha de combustível, motor eléctrico, Brushless, Controlo de tracção.

Resumo

O presente trabalho visa a implementação de um sistema de tracção baseado em pilha de combustível. Apresenta como objectivo principal a sua inclusão num veículo automóvel, cuja eficiência deverá ser o ponto fulcral. De facto, na origem da concepção deste veículo está a participação na prova de eficiência “Shell Eco Marathon”.

Nesse sentido, foi necessário elaborar um estudo do estado de arte relativo às pilhas de combustível, de modo a definir uma tecnologia cujos requisitos se encontrem enquadrados com o sistema a desenvolver.

Posteriormente, efectuou-se um estudo relativo aos motores eléctricos de acordo com as especificações.

Desenhou-se um controlador electrónico capaz de efectuar o controlo do motor. Este proporciona o controlo da velocidade e rotação do mesmo. A gama de velocidade implementada varia desde os 250 rpm e os 3400 rpm.

Ao longo desta dissertação são apresentados os conteúdos descritos anteriormente, bem como os principais resultados e conclusões retiradas da realização do trabalho.

Keywords

Fuel Cell, Electric Motors, Brushless, Traction Control

Abstract

This work aims the implementation of a traction system based on fuel cells. Displays primary purpose for inclusion in a car, whose efficiency should be the focal point. Indeed, behind the design of this vehicle is the participation in the efficiency challenge called "Shell Eco Marathon".

Accordingly, it was necessary to prepare a study on the fuel cells state of the art in order to define a technology whose requirements are framed with the system to develop.

Subsequently, a study of the electric motors in accordance with the specifications.

Drew is an electronic controller able to check the engine. This provides the control of rotation speed and the direction of the motor. The range of speed implemented varies from 250 rpm and 3400 rpm.

Throughout this dissertation are the contents described above, and the main results and conclusions drawn from the completion of work.

Índice

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas.....	vi
Lista de Acrónimos.....	vii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivações e objectivos	1
1.3 Resultados Principais.....	2
1.4 Estrutura da dissertação	3
2 Pilhas de combustível e Motores Eléctricos	5
2.1 Pilha de combustível	5
2.1.1 História	6
2.1.2 Célula de combustível	7
2.1.3 Pilha de Combustível	15
2.1.4 Tipos de pilhas de combustível	17
2.1.5 Produtos existentes no mercado	26
2.2 Motores eléctricos.....	31
2.2.1 Princípios físicos	31
2.2.2 Tipos de motores eléctricos	33
2.2.3 Adequação.....	37
3 Controlo motor	41
3.1 Tipos de controlo	41
3.1.1 Rotação.....	44
3.1.2 Controlo de Velocidade	49
3.2 Implementação do controlo	59
3.2.1 Microcontrolador.....	60
3.2.2 Driver	61
3.2.3 Medição de corrente do motor.....	65
3.2.4 Alimentações	65
3.2.5 Sinais de referência	66
3.2.6 Comunicação série	66
3.2.7 Programação	67
3.2.8 Esquemático e PCB.....	67
3.2.9 Software	69
3.2.10 Protocolo de comunicação	72
3.2.11 Interface Gráfica.....	76
4 Testes e resultados	79
4.1 Testes	79
4.1.1 Determinação das Constantes do compensador PI	80
4.1.2 Controlo de velocidade em malha aberta	80
4.1.3 Controlo de velocidade em malha fechada	80
4.1.4 Medição da corrente	81
4.2 Resultados.....	81
4.2.1 Determinação das Constantes do compensador PI	81
4.2.2 Controlo de velocidade em malha aberta	82
4.2.3 Controlo de velocidade em malha fechada	85

4.2.4	Medição da corrente.....	88
5	Conclusões e trabalho futuro	91
5.1	Conclusões	91
5.2	Trabalho futuro	92
	Referências	95
	Anexo I.....	97
	Projecção das características necessárias ao motor.....	97
	Pressupostos físicos.....	97
	Redução.....	98
	Potência	99
	Motor Seleccionado	100
	Motor de Testes	101
	Anexo II.....	102
	Influência das constantes do compensador PID	102
	Anexo III.....	103
	Esquemático global do controlador.....	103
	Anexo IV	107
	Placa de Circuito Impresso criada	107
	Camada Superior (Top).....	107
	Camada Inferior (Bottom).....	108
	Anexo V	109
	Ligações efectuadas no controlador	109
	Conector das sondas de Hall.....	109
	Conector de ligação aos enrolamentos do motor	109
	Conector de alimentação	110
	Anexo VI	111
	Lista de comandos para controlo por porta-série	111
	Controlo da velocidade do motor por porta-série	115

Lista de Figuras

Figura

2.1	Aspecto da “pilha de Grove”	6
2.2	Esquema de uma célula básica de combustível.....	10
2.3	Característica i-V de uma célula de combustível, com as diversas perdas associadas	11
2.4	Figura ilustrativa de uma stack de células de combustível.....	16
2.5	Modelo FC-42 da Heliocentris	28
2.6	Nexa® Power Module, da Ballard Power Systems.....	29
2.7	Modelo H1000, comercializado pela Horizon.....	30
2.8	Representação da interacção das linhas de força provocadas por dois pares de pólos	32
3.1	Esquema representativo da direcção da corrente presente em cada enrolamento, para os diversos estados possíveis.....	42
3.2	Representação de um estado do motor com indicação da organização dos enrolamentos.....	43
3.3	Esquema representativo do funcionamento de um encoder	45
3.4	Aspecto físico dos discos ópticos perfurados de um encoder.....	45
3.5	Esquema do funcionamento de um Tacómetro por efeito de Hall	47
3.6	Representação do tipo de força contra electromotriz gerada por um motor Brushless	48
3.7	Representação do Duty-Cycle de um sinal genérico.	50
3.8	Esquema geral do controlo em malha aberta de um sistema	51
3.9	Representação eléctrica de um motor Brushless	52
3.10	Resposta teórica do motor ao degrau unitário com várias cargas acopladas.....	55

3.11	Esquema geral do controlo em malha fechada de um sistema.....	56
3.12	Esquema global de um compensador PID.....	57
3.13	Esquema do controlo usado.....	59
3.14	Microcontrolador com as diversas ligações usadas.....	61
3.15	Configuração usada para efectuar drive de corrente para o motor.....	62
3.16	Driver de corrente para o motor (circuito completo).....	63
3.17	Charge Pump externo usado.....	64
3.18	Circuito de medição de corrente do motor.	65
3.19	Circuitos usados para obtenção das diversas tensões no circuito.....	66
3.20	Conversor de sinais série para USB e vice-versa.....	67
3.21	Esquema de montagem do cabo de programação.	67
3.22	Imagem do controlador implementado.....	68
3.23	Diagrama de estados implementado.....	70
3.24	Representação do protocolo de comunicação implementado.	73
3.25	Representação do comando enviando pelo dispositivo Master.	74
3.26	Representação da resposta enviada pelo Controlador	74
3.27	Diagrama de blocos da acomodação dos comandos por parte da porta-série.	76
3.28	Figura representativa do interface gráfico criado.	77
3.29	Diagrama de estados usado pelo dispositivo Master de modo a recolher dados do controlador.....	78
4.1	Resposta do motor em malha aberta para uma velocidade de referência de 3400 rpm.	83
4.2	Resposta do motor em malha aberta para uma velocidade de referência de 2686 rpm.	83
4.3	Resposta do motor em malha aberta para uma velocidade de referência de 1904 rpm.	84

4.4	Erro estacionário obtido em malha aberta a diferentes velocidades de referência.	85
4.5	Resposta do motor em malha fechada para uma velocidade referência de 3400 rpm.....	85
4.6	Resposta do motor em malha fechada para uma velocidade referência de 1300 rpm.....	86
4.7	Resposta do motor em malha fechada para uma velocidade referência de 250 rpm.....	87
4.8	Erro estacionário obtido em malha fechada para as diferentes velocidades de referência.	87
4.9	Representação da corrente média aplicada ao motor para velocidades distintas.	88
4.10	Corrente média aplicada ao motor para diferentes velocidades.....	89

Lista de Tabelas

Tabela

2-1	Tabela de comparação das diferentes tecnologias de pilhas de combustível.	26
2-2	Principais características do motor DC.	38
2-3	Principais características do motor DC Brushless.	39
3-1	Valores característicos do motor usado.....	54
3-2	Tabela que relaciona os sensores de Hall com os enrolamentos activos. Direcção: Forward.	71
3-3	Tabela que relaciona os sensores de Hall com os enrolamentos activos. Direcção: Reverse.	71
3-4	Configurações de origem da comunicação série no controlador.	73
3-5	Comandos disponíveis para efectuar comunicação com o controlador.	75
4-1	Valores encontrados para construção do compensador PI.	82

Lista de Acrónimos

AC	Alternating Current
AFC	Alkaline Fuel Cell
DC	Direct Current
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
GUIDE	Graphical User Interface Design Environment
LED	Light Emitting Diode
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MEA	Membrane Electrode Assembly
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NMOS	MOSFET de canal N
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PCB	Printed Circuit Board
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PMOS	MOSFET de canal P
PWM	Pulse With Modulation
RC	Circuito Resistência-Condensador
SOFC	Solide Oxide Fuel Cell
USB	Universal Serial Bus
YSZ	Yttria-Stabilizes-Zirconia

1 Introdução

1.1 *Enquadramento*

O trabalho apresentado enquadra-se num projecto abrangente denominado por Ícaro. Este é caracterizado pela construção de um veículo automóvel cujo requisito fundamental é a eficiência. De facto, o principal objectivo aquando da construção deste veículo será a sua inclusão na prova “Shell Eco Marathon”.

Pretende-se, assim, desenvolver o sistema de tracção para este veículo baseado em pilha de combustível. Deste modo, dever-se-á criar um controlador que permita fornecer potência necessária ao motor eléctrico. Este controlador terá como principais funções o controlo de velocidade e sentido de rotação do motor. De acordo com os requisitos, a eficiência do sistema implementado deverá ser uma característica a ter sempre em conta.

Assim, ao longo deste documento serão descritos os pormenores de construção do controlador, bem como as decisões efectuadas ao longo do desenvolvimento do mesmo.

1.2 *Motivações e objectivos*

Numa altura em que os recursos energéticos não renováveis são cada vez mais escassos, é necessário tomar medidas que proporcionem quer a contenção

do consumo, quer o aumento da eficiência dos intervenientes no processo. O sector automóvel é, sem dúvida, um dos sectores que necessita, urgentemente de requalificação. A eficiência de um motor de combustão interna é muito reduzida, quando comparada com novas tecnologias que emanam (Rousseau, A., Sharer, P., 2004). Nesse sentido todo o sistema energético deve ser repensado. O trabalho efectuado surge nessa mesma direcção.

Os objectivos principais deste trabalho prendem-se com um estudo aprofundado dos diversos tipos de pilhas de combustível assim como o estudo dos motores eléctricos. Posteriormente, pretende-se implementar um controlador cujas valências proporcionadas foram já referidas. Por fim, pretende-se efectuar um conjunto de testes que derivem as principais valências do controlador desenhado e, por outro lado, que demonstrem as lacunas do mesmo.

1.3 Resultados Principais

Foram efectuados variados testes ao desempenho do controlador desenhado. Numa primeira abordagem, o controlador tem que fazer rodar o motor proporcionando controlo na velocidade deste, assim como no sentido de rotação. Pelos testes que foram efectuados foi possível verificar o correcto funcionamento do motor perante as ordens que lhe são dadas.

Foram efectuados testes para o controlo da velocidade do motor em malha aberta e malha fechada. Em malha aberta, o valor de velocidade em regime estacionário que o motor apresenta difere da velocidade pretendida. A diferença entre a velocidade de referência e a velocidade obtida em regime estacionário – erro em regime estacionário – é maior para as velocidades inferiores, sendo que para a velocidade máxima de referência – 3400 rpm – o motor atinge uma velocidade em regime estacionário superior a este valor.

No caso do controlo em malha fechada, verifica-se que o erro em regime estacionário obtido é aproximadamente nulo. A velocidade mínima a que se consegue obter rotação é de 250 rpm. Para velocidades inferiores o funcionamento não é constante.

Quando o motor se apresenta a rodar em regime estacionário, apresenta uma oscilação no valor da velocidade de cerca de 40 rpm em torno da velocidade de referência.

1.4 *Estrutura da dissertação*

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo efectua-se um pequeno enquadramento do trabalho a realizar, mostrando as suas principais motivações e objectivos, sendo que, por fim, serão relatados os principais resultados obtidos.

No segundo capítulo, são abordados dois grandes temas – pilhas de combustível e motores eléctricos. De facto, esta será a base do trabalho a efectuar posteriormente, portanto, uma correcta escolha é essencial à criação de um sistema com as características já mencionadas. Assim, serão abordados quer os tipos de pilhas de combustível quer de motores eléctricos existentes, de modo a efectuar uma adequação aquando do desenho do controlador.

No capítulo terceiro, é apresentada uma discussão relativa ao tipo de controlo a efectuar, bem como a apresentação do controlo proposto, quer em termos genéricos, quer em pormenor. Nestes pontos são abordadas as questões de índole técnica, quer de Hardware, quer Software. É apresentado também o protocolo de comunicação usado que permite uma comunicação com diversos dispositivos por porta série. Por fim, é apresentado um interface gráfico criado com o intuito de proporcionar uma leitura dos resultados obtidos em tempo útil.

No quarto capítulo são apresentados os testes efectuados, assim como os resultados obtidos mediante a realização desses mesmos testes.

Finalmente, no último capítulo – quinto – são apresentadas as conclusões retiradas da realização deste mesmo trabalho, assim como algumas propostas de trabalho futuro, que proporcionem um melhor desempenho do controlador desenvolvido.

2 Pilhas de combustível e Motores Eléctricos

Ao longo deste capítulo, serão abordados os conceitos relativos quer às pilhas de combustível quer, por outro lado, aos motores eléctricos. Este será de facto o ponto de partida, dado que as especificações de um controlador derivam directamente das características de cada um destes componentes.

2.1 Pilha de combustível

Uma pilha de combustível é um dispositivo electroquímico, capaz de produzir corrente eléctrica. Esta é gerada apenas por uma reacção química, não havendo assim lugar a queima de combustível nem, tampouco, a emissão de quantidades de gases poluentes aquando do seu funcionamento. Assim, ao longo deste capítulo vamos abordar o conceito de pilha de combustível, estudando com algum pormenor o seu modo de funcionamento, assim como as suas características mais relevantes (O'Hayre, R., Cha, S.W., Colella, W., Prinz, F., 2006).

2.1.1 História

Em 1800, William Nicholson e Anthony Carlisle, dois cientistas britânicos da época, descobriram que ao empregar corrente eléctrica na água, as suas moléculas eram decompostas em hidrogénio e oxigénio. Alguns anos mais tarde, em 1839, Sir William Grove descobre que esta reacção é reversível. Assim, descobre que ao colocar dois eléctrodos de platina com uma das pontas de cada mergulhado em ácido sulfúrico, e as outras pontas colocadas em recipientes de oxigénio e hidrogénio separadamente, flui uma corrente entre os eléctrodos assim como o nível de água nos recipientes sobe. Então, combinou várias células iguais às descritas anteriormente, produzindo o que ficou conhecido mais tarde por “Pilha de Grove”. Na figura seguinte, Figura 2.1, poder-se-á verificar o aspecto dessa mesma pilha.

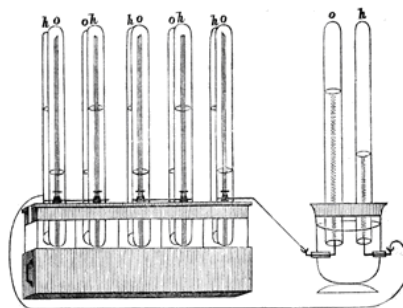


Figura 2.1: Aspecto da “pilha de Grove”. (Fonte: National Museum of American History)

Infelizmente, as correntes produzidas pela pilha de Grove eram diminutas, o que levou a que esta realização não tivesse grande impacto.

Em 1889, Mond e Langer usando os trabalhos levados a cabo por Grove, tentaram usar ar em vez de oxigénio, assim como carvão gaseificado em vez de hidrogénio. Desde essa altura, foram vários os trabalhos de alguns investigadores, com o intuito de tornar esta tecnologia viável. Temos como exemplos nomes como Ostwald, Haber, e Bauer. Este último, com a ajuda dos seus colaboradores, desenvolveu uma pilha cuja temperatura de funcionamento ascendia aos 1000° C. No entanto, nenhuma destas progressões levou a que a Pilha de Combustível se tornasse uma tecnologia com interesse económico.

Um notável impulso para a tecnologia das pilhas de combustível foi efectuado, sobretudo, por Thomas Bacon, um engenheiro associado à Universidade de Cambridge. Bacon insistiu na ideia de abandonar eléctrodos com platina (Pt), dado, sobretudo, o seu valor comercial. Assim, em 1939, Bacon construiu uma pilha de combustível onde os eléctrodos eram de níquel, em forma

de gaze, dispensando assim o uso de platina. Esta pilha era caracterizada pelo seu funcionamento a temperatura e pressão elevadas, 200° C e 3000 psi, respectivamente. Depois de alguns aperfeiçoamentos na pilha inicial, Bacon foi inclusive capaz de efectuar uma demonstração de um sistema de cerca de 5 kW de potência.

Após estas importantes contribuições de Bacon, o Programa Espacial Americano investiu na tecnologia e passou a inclui-la nas suas missões, nomeadamente na missão Apollo à Lua. Este facto levou a que a investigação à volta desta tecnologia fosse incrementada, dadas as potencialidades observadas na mesma. Tais potencialidades são, por exemplo, produção de energia de forma autónoma, tecnologia bastante silenciosa quando comparados com outras, e, sobretudo, o potencial a nível de rendimento. Por fim, o facto de, idealmente, não emitirem produtos poluentes para o meio ambiente.

A partir desta altura, diversas tecnologias surgiram, sendo que nos anos noventa apareceu nos Estados Unidos da América o primeiro veículo com motor eléctrico, alimentado por pilha de combustível. No entanto, dificuldades económicas estiveram na origem do fracasso deste veículo.

Na actualidade, são diversas as tecnologias a serem desenvolvidas. No entanto, a falta de amadurecimento de algumas destas, assim como os custos inerentes, *per se*, colocam entraves à sua produção em massa. Outras tecnologias foram já praticamente abandonadas, dado a sua complexidade assim como à falta de soluções para ultrapassar os problemas que foram surgindo.

Todas as vantagens inerentes à tecnologia das pilhas de combustível, levam a que esta se torne numa das mais importantes tecnologias emergentes dos nossos dias (Harver, G.D.J, 2008).

2.1.2 Célula de combustível

Uma pilha de combustível, tal como o nome indica, é uma aglomeração de várias células elementares, denominadas por célula de combustível. De uma forma simplista, a pilha é concebida associando apenas células de combustível em série. Assim, torna-se fulcral perceber o funcionamento da célula básica.

2.1.2.1 Princípios gerais

Uma célula de combustível pode ser encarada como uma fábrica, fábrica esta que mediante algumas entradas, efectua o processamento destas,

produzindo assim algumas saídas. No caso da célula de combustível, as entradas são oxigénio e hidrogénio, e as suas saídas são electricidade, água e calor.

Nas células de combustível, contrariamente às baterias, por exemplo, há produção de energia enquanto houver combustível. No entanto, o seu modo de funcionamento leva a que o combustível não seja queimado, contrariamente a um motor de combustão interna. Na célula de combustível, tal como num motor de combustão interna, a energia química é transformada em energia eléctrica. No entanto, o que traz efectivamente algumas vantagens à célula de combustível é o facto de a transformação nestas ser directa, enquanto que no motor de combustão interna é efectuada por vários passos, nomeadamente:

$$E_{química} \rightarrow E_{calorífica} \rightarrow E_{mecânica} \rightarrow E_{eléctrica} \quad (2.1.1)$$

Como já se referiu no ponto anterior, Sir William Grove descobriu que a reacção que provoca a hidrólise da água poderia ser reversível. Assim, o princípio de funcionamento da célula de combustível é caracterizado pela seguinte reacção:



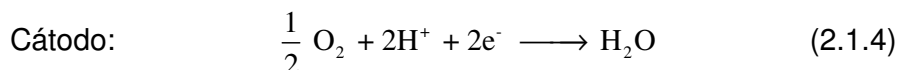
Embora não espontaneamente – mecanismo que será explicitado na secção seguinte – a reacção ocorre devido a colisões entre moléculas de oxigénio e hidrogénio. Os produtos da reacção, como já foi dito anteriormente, são a electricidade, água assim como libertação de calor. No decorrer da reacção, algumas ligações são quebradas e criadas, sendo para isso necessário a transferência de electrões.

Mediante os produtos de reacção, este processo poderia ter, à partida, dois tipos de aproveitamento. São eles o aproveitamento calorífico e o aproveitamento eléctrico. Poder-se-ia aproveitar o calor provocado pela reacção para gerar energia, embora este fosse um aproveitamento ineficaz. Assim, a solução passa por aproveitar a necessidade de transferência de electrões à ocorrência da reacção, para se produzir electricidade.

A forma de tornar a electricidade produzida viável, passa por fazer circular os electrões por um circuito externo, com o fim de não fazer um curto-circuito à célula de combustível. Tal tarefa constitui uma das várias dificuldades das células de combustível e que serão abordados mais à frente.

2.1.2.2 Célula Básica

Do ponto de vista químico, uma célula de combustível pode ser explicitada, como já foi referido anteriormente, pela expressão 2.1.2. No entanto, não é trivial notar que a partir desta reacção pode ser gerada corrente eléctrica. Assim, para uma percepção mais nítida, é comum decompor-se a reacção principal em duas meias reacções. Estas podem ser vistas em baixo:



Como se pode verificar, os produtos da reacção ocorrida no ânodo, são necessários do lado do cátodo para que a sua meia reacção ocorra. No entanto, e como já foi referido, tem de existir algum mecanismo que possibilite a separação das duas meias reacções. Caso contrário, não haveria lugar ao aproveitamento dos electrões para produção de electricidade. Assim, a separação das reacções é feita com o auxílio de um electrólito. Um electrólito não é mais que um material capaz de isolar o ânodo do cátodo, permitindo que apenas os iões o atravessem, negando assim a passagem de electrões. Como se pode verificar pelas meias reacções expostas anteriormente, a função do electrólito, neste caso, é assegurar que apenas os iões 2H^+ o atravessem, podendo assim atingir o cátodo.

Por outro lado, os electrões são também necessários para que ocorra a reacção no cátodo. Então, usa-se um circuito externo que providencie a transferência de electrões desde o ânodo até o cátodo. Esse circuito externo será basicamente composto por dois eléctrodos, mergulhados, um no lado do ânodo, outro do lado do cátodo, sendo ligados entre si por um material condutor. Desta forma, é assim possível aproveitar este circuito externo para se providenciar potência a uma carga.

Por fim, é necessário em algumas tecnologias usar também um componente responsável por tornar a célula de combustível robusta. Esse componente é denominado por Gas Diffusion Layer. Além de dar robustez à célula, este componente é responsável por manter os níveis de reagentes e produtos em concentrações que permitam um correcto funcionamento da célula.

Embora praticamente todos os elementos que constituem uma célula de combustível estejam já descritos, existe um elemento que possibilita que a reacção ocorra. A reacção que se pretende que ocorra na célula de combustível não é espontânea, ou seja, há necessidade de a provocar. O objectivo atinge-se usando catalisadores. Estes estão geralmente agregados aos eléctrodos.

Na Figura 2.2 é possível verificar esquematicamente uma célula básica de combustível.

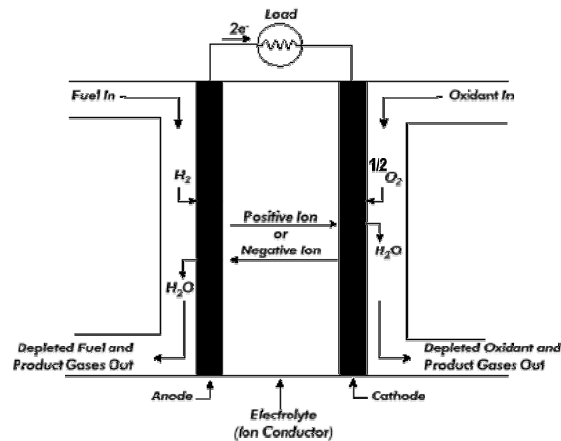


Figura 2.2: Esquema de uma célula básica de combustível. (Fonte: Hirschenhofer, J.H., Stauffer, D.B, Engleman, R.R., Klett, M.G., 1998)

Assim, os elementos básicos necessários a uma célula de combustível são:

- Electrólito;
- Eléctrodos;
- Catalisador;
- Gas Diffusion Layer.

2.1.2.3 Características eléctricas

No que diz respeito às características eléctricas, é importante salientar que uma célula de combustível, e de acordo com as leis da termodinâmica, produziria, dependendo da tecnologia usada, uma tensão aos seus terminais próxima de 1 – 1.2 V. No entanto, as pilhas actualmente existentes, para além de não exibirem estes valores, não os mantêm constantes para uma gama de densidades de corrente. Assim, se contextualizarmos estes valores, nos apercebemos que são irrisórios, quando comparados com as necessidades de qualquer equipamento actual. Portanto, a solução passa pela agregação de diversas células em série, aumentando assim a tensão aos seus terminais. A essa agregação dá-se o nome de pilha de combustível, ou do inglês *fuel cell stack*. Esta solução será descrita mais à frente.

Relativamente às correntes produzidas por uma célula de combustível, verifica-se que estas são praticamente proporcionais à área da mesma.

De acordo com o que foi dito anteriormente, seria de pensar que a partir de uma célula se conseguiria obter tanto correntes como tensões de acordo com as

necessidades, apenas alterando a área da mesma, assim como a quantidade de células aglomeradas. No entanto, na prática, a corrente exigida por um determinado equipamento é quase sempre variável ao longo do tempo. Então torna-se necessário perceber qual o comportamento da célula de combustível mediante as necessidades de corrente dos dispositivos. Nesse sentido, é comum apresentar-se um gráfico que evidencia a característica de uma célula de combustível, no que diz respeito à sua curva de tensão, em relação à corrente produzida. Um exemplo dessa curva pode ser visto na Figura 2.3.

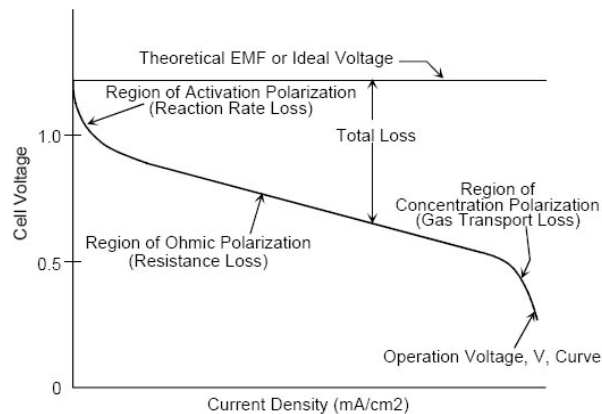


Figura 2.3: Característica i-V de uma célula de combustível, com as diversas perdas associadas.
(Fonte: O'Hayre, R., Cha, S.W., Colella, W., Prinz, F., 2006)

Como se pode verificar, à medida que é solicitada à pilha uma maior corrente por unidade de área, a tensão aos seus terminais diminui. Desta forma, a potência que uma célula de combustível pode fornecer, estará também limitada, dado que $P = V \cdot i$. Assim, a tensão apresentada pela célula de combustível pode ser encarada como a eficiência da mesma, ou seja, quanto maior a tensão, maior a eficiência. No entanto, e como se pode verificar na figura 2.3, numa célula de combustível real, quanto maior é a densidade de corrente pedida à mesma, menor será a tensão apresentada aos seus terminais. Poder-se-á verificar que, inicialmente, ou seja, quando a densidade de corrente pedida à célula é diminuta, esta apresenta, o valor mais próximo da tensão teórica. Este valor é imposto pela Termodinâmica. À medida que a densidade de corrente exigida à pilha aumenta, vários factores levam a que algumas perdas aconteçam.

Essas perdas podem ser:

- Perdas de activação;
- Perdas Ohmicas;
- Perdas por concentração.

Assim, poder-se-á encontrar uma expressão que relacione a tensão presente aos terminais da pilha com os diversos tipos de perdas associados.

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{termodinâmica}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohmic}} - \eta_{\text{conc}} \quad (2.1.5)$$

Em que,

$E_{\text{termodinâmica}}$, representa a tensão ideal imposta pela termodinâmica;

η_{act} , representa as perdas de activação;

η_{ohmic} , representa as perdas Ohmicas, e

η_{conc} , representa as perdas de concentração.

2.1.2.3.1 Leis da Termodinâmica

No que diz respeito à termodinâmica, podem-se tentar perceber alguns processos que ocorrem numa célula de combustível. Como já foi dito anteriormente, numa célula de combustível ocorre transformação de energia química para energia eléctrica. No entanto, e de acordo com as leis da termodinâmica, existem limites a esse processo de transformação. Esses limites são impostos pela primeira e segunda leis da termodinâmica.

Assim, a primeira lei - lei da conservação da energia – anuncia duas formas de transferência de energia – calor e trabalho. Essa lei é enunciada da seguinte forma:

$$\partial U = \partial Q - \partial W \quad (2.1.6)$$

Em que,

U, é a energia do sistema;

Q, é o calor libertado, e

W, o trabalho produzido.

A segunda lei da termodinâmica, introduz um novo conceito – o conceito de entropia. A entropia não é mais que uma medida da desordem do sistema. Assim, indica, basicamente, o número de configurações que o mesmo possibilita. Usando estas duas leis, consegue-se encontrar o máximo valor admissível para a tensão aos terminais de uma célula de combustível. Esse valor não é igual para as diferentes tecnologias. Assim, as células de combustível que funcionam a baixas temperaturas, 40°C – 80°C, apresentam uma tensão máxima prevista pelas leis da termodinâmica de aproximadamente $E_{\text{ter mo}} = 1.2V$. Já as pilhas de temperatura de funcionamento elevado, 800°C, a temperatura de funcionamento será cerca de $E_{\text{ter mo}} = 1V$.

Esta informação indica-nos que qualquer que seja a célula de combustível, qualquer que seja a tecnologia usada, nenhuma consegue ultrapassar este valor de tensão aos seus terminais.

2.1.2.3.2 Perdas de activação

Este tipo de perdas, ocorre, devido ao facto de ser necessário, aquando da activação da célula de combustível, fornecer energia. Esta quantidade de energia é responsável por assegurar que a reacção ocorre no sentido de formar água e electricidade, em detrimento da sua reacção inversa. Por essa mesma razão, estas perdas ocorrem devido ao facto de ainda não se ter iniciado o processo químico. A necessidade desta porção de energia é essencialmente usada para dois fins. Por um lado, forçar a divisão do hidrogénio em protões, H^+ , e electrões, e^- . Por outro, fazer com que os protões criados, viajem através do electrólito. Assim, este tipo de perdas só ocorre a baixas densidades de corrente **nas células de combustível de baixa temperatura**.

Este tipo de perdas pode, no entanto, ser minimizado usando para tal algumas técnicas:

- Variar temperatura de funcionamento;

No que diz respeito às temperaturas, e de acordo com o que foi dito anteriormente, à medida que se aumenta a temperatura de funcionamento da pilha, menores são as perdas associadas à activação. Assim, actuando neste parâmetro mediante as possibilidades, pode-se melhorar a eficiência da célula de combustível, diminuindo assim as perdas de activação.

- Actuar nos catalisadores.

No que diz respeito aos catalisadores, várias opções podem ser tomadas por forma a melhorar a eficiência da célula. Aqui as soluções passam ou por usar catalisadores com forma rugosa. Dado que aumentam a área de contacto, permitem que as reacções ocorram mais rapidamente. Outra possibilidade passa por aumentar a pressão de funcionamento da célula. Este acto faz com que os efeitos do catalizador sejam mais sentidos. Por fim, a utilização de catalisadores com melhor performance provocam uma diminuição neste tipo de perdas. Neste campo, é geralmente preferível o uso de Níquel e Platina.

2.1.2.3.3 Perdas Ohmicas

No que diz respeito a dispositivos eléctricos, as perdas Ohmicas são o tipo de perdas mais frequente, não sendo a pilha uma excepção. O seu nome é reportado à lei de Ohm. As perdas Ohmicas estão, então, associadas à resistência criada ao fluxo de electrões entre o cátodo e o ânodo. Sendo assim, e do mesmo modo que na lei de Ohm,

$$V = R \cdot i \quad (2.1.7)$$

a resistência criada em relação a uma necessidade de fluxo, R , associada a uma densidade de corrente, i , provoca então perdas de tensão, V , na célula, diminuindo assim a tensão aos seus terminais. Como se pode verificar, este tipo de perdas é assim proporcional à densidade de corrente que a pilha fornece, ou seja, quanto maior é a densidade de corrente pedida à célula, maior serão as perdas associadas.

Esta é a maior fonte de perdas na célula, quer se esteja a falar de células de funcionamento a baixa ou altas temperaturas. No entanto, reflecte-se apenas nas médias densidades de corrente, tal como se verifica na figura 2.3. Como forma de se diminuir estas perdas, é possível usar algumas técnicas, nomeadamente usar eléctrodos altamente condutores, ou reduzir a distância que os electrões têm que percorrer, uma vez que a resistência é proporcional à distância. Por outro lado, reduzindo-se a espessura do electrólito, diminui-se também a resistência, diminuindo, de igual forma, as perdas associadas.

2.1.2.3.4 Perdas por concentração

No que diz respeito a este tipo de perdas, está associado apenas às elevadas densidades de corrente. Afecta, no entanto, tecnologias de baixa ou altas temperaturas.

Em situações de elevada densidade de corrente, o hidrogénio é usado a uma taxa elevada. Deste modo, a pressão parcial do hidrogénio cai, reduzindo a taxa a que a reacção ocorre. Caso semelhante ocorre do lado do cátodo com o oxigénio. De igual forma, as elevadas concentrações de combustível ou oxigénio desaparecem. Esta situação ocorre essencialmente porque a célula consome reagentes mais rapidamente do que aquilo que lhe pode ser alimentado.

2.1.2.4 Performance

Como se verificou até agora, comparativamente com os modelos ideais previstos pela termodinâmica, as células de combustível apresentam ainda algumas limitações. Apesar disso, a eficiência global da célula tem vindo a ser aumentada. Para tal, usam-se células finas e em estrutura planar. Os electrólitos são, geralmente, porosos de modo a permitir uma superfície de reacção superior. Existem, no entanto, várias técnicas, assim como varias tecnologias, que possuem modos de funcionamento substancialmente diferentes.

No que diz respeito às características eléctricas das células, verifica-se que os valores de tensão obtidos neste momento, encontram-se ainda um pouco afastados dos valores previstos pelas leis da termodinâmica. Além disso, a resposta da célula a diferentes necessidades de corrente, e devido a diversas perdas, não é linear.

2.1.3 Pilha de Combustível

Neste momento, e após se uma cuidada apresentação dos conceitos relativos à célula de combustível, serão, de seguida considerados os diferentes componentes que possibilitam a existência de pilhas de combustível.

2.1.3.1 Stack

Como já foi destacado anteriormente, a tensão obtida aos terminais de uma célula básica de combustível real, encontra-se aproximadamente na gama 0.5-1V. Na prática, não seria viável a sua comercialização usando valores tão diminutos. Por forma a se contornar este obstáculo, efectua-se a ligação de diversas células em série, ate que estas possuem aos seus terminais a tensão desejada. Ao conjunto de células em série é comum o nome de stack de células, pilha de combustível. Uma caracterização detalhada de uma pilha de combustível encontra-se na figura seguinte.

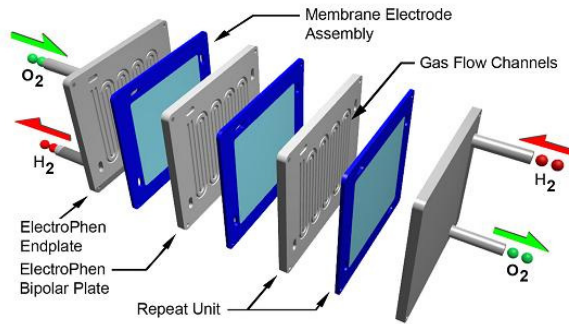


Figura 2.4: Figura ilustrativa de uma stack de células de combustível. (Fonte: Bac2 Conductive Composites)

O facto de se agregar diversas células, possibilita o seu real uso. Efectivamente, e como seria de esperar, são associados também a este, alguns problemas físicos. Esses problemas serão agora estudados com algum detalhe.

Até agora, apenas nos focamos nos aspectos conceptuais das pilhas, nomeadamente forma de actuação, princípios químicos, assim como reagentes e produtos. Na realidade, alguns problemas decorrem da aglomeração das células. Assim, e dado que na concessão de um sistema deste tipo se tem em vista um produto robusto, é necessário um leque de equipamentos extra que tornem efectivamente uma pilha de combustível funcional.

Algumas das dificuldades encontradas após emparelhamento são:

- Alimentação dos reagentes;
- Sistema de refrigeração;
- Controlo de água;
- Propagação correcta dos reagentes;
- Estabilização da saída.

No que diz respeito à obtenção de reagentes, surgem à partida algumas questões. A sua proveniência, é uma palavra-chave a considerar. Como se sabe, o hidrogénio, H_2 , não se encontra, geralmente isolado na natureza. Assim, é necessária a sua produção. Uma das questões que se levantam será onde se efectuará a sua produção. Duas hipóteses surgem de imediato:

- Produção externa
- Produção na pilha de combustível

Ambos os cenários são possíveis, sendo que no primeiro caso, o hidrogénio produzido será armazenado em recipientes adequados, e ligados directamente à pilha de combustível. No segundo caso, é necessário, então, um elemento adicional à pilha, denominado por *reformer*. Este elemento produz hidrogénio a

partir de hidrocarbonetos, nomeadamente Gás Natural ou Gasolina. Não evitam, no entanto, uma eliminação completa de Monóxido de Carbono, o que danifica, ao longo do tempo, a estrutura da pilha de combustível (Hirschenhofer, J.H., Stauffer, D.B, Engleman, R.R., Klett, M.G., 1998).

O controlo das concentrações quer dos reagentes quer dos produtos, assim como o controlo da refrigeração da stack não é simples. Desta forma, torna-se necessário incluir na sua constituição um novo componente. A esse novo componente é usual chamar placas bipolares. Estas placas, para além de garantirem uma correcta concentração dos reagentes, são também responsáveis por expelir a quantidade de água em excesso, caso exista. Além disso, efectua a separação entre células distintas. É também comum que, onde seja necessário, efectue refrigeração, ao permitir que líquidos como a água, por exemplo, passem no seu interior. Várias configurações para este componente são possíveis. Uma representação do mesmo pode ser visto na fig. 2.4.

2.1.4 Tipos de pilhas de combustível

De seguida, serão apresentadas as mais variadas tecnologias de pilha de combustível, derivando as diferentes características de cada uma dessas tecnologias.

2.1.4.1 Apresentação dos diversos tipos

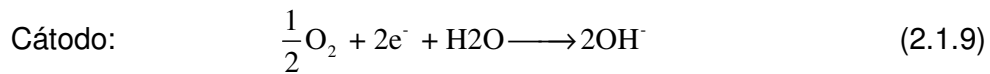
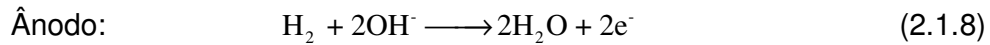
Como foi sendo observado anteriormente, existem actualmente, diversas tecnologias sob investigação. No entanto, outras são actualmente observadas no seu sentido mais histórico. No que diz respeito à organização das diversas tecnologias por grupos, é de salientar que várias configurações seriam possíveis, nomeadamente temperatura de funcionamento, tipos de reagentes, assim como outros. Apesar disso, o agrupamento é geralmente feito em termos de electrólito usado.

Desta forma, são cinco os diferentes tipos de pilhas enumeradas:

- Alkaline Fuel Cell, AFC;
- Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC;
- Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC;
- Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC e
- Solid-Oxide Fuel Cell, SOFC.

2.1.4.1.1 AFC

Por motivos históricos, é comum enunciar-se este tipo de pilha, embora o seu uso na actualidade seja reduzido. Este tipo de pilha de combustível é caracterizado por usar um electrólito de hidróxido de potássio. Contrariamente às pilhas de combustível ácidas, as pilhas de combustível alcalinas conduzem iões OH^- desde o cátodo até ao ânodo. Assim, as reacções que ocorrem neste tipo de pilhas de combustível são:



Como se pode verificar, os iões OH^- produzidos no cátodo, são usados como reagente no ânodo, formando assim moléculas de água, assim como electrões. Esses electrões serão necessários no lado do cátodo para que a sua reacção possa prosseguir. Será então de salientar o facto de que a água é produzida duas vezes mais rapidamente no lado do ânodo, que aquilo que é consumida do lado do cátodo. Assim, e como é intuitivo, há necessidade de remoção da água excedente, evitando assim a danificação do electrólito. A eficiência desta tecnologia ronda os 60 – 70%. Estamos então em condições de avaliar algumas das vantagens e desvantagens desta tecnologia.

Vantagens:

- Performance superior do lado do cátodo;
- Potencial uso de catalizadores com metais não preciosos;
- Custos reduzidos, sobretudo no electrólito.

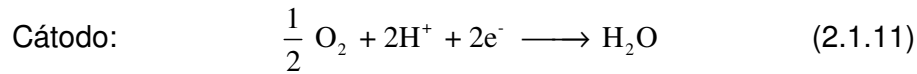
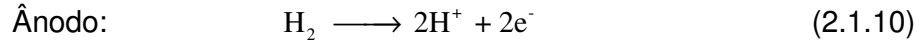
Desvantagens:

- Necessita de combustível e oxidante puros ($\text{H}_2 - \text{O}_2$);
- Electrólito pode necessitar de ser substituído, ocasionalmente;
- Necessidade de remover excesso de água do ânodo;

2.1.4.1.2 PAFC

No caso desta tecnologia, usa um electrólito líquido de H_3PO_4 (ácido fosfórico), contido numa fina matriz de SiC (carboneto de silício). Este conjunto

encontra-se entre dois eléctrodos de grafite poroso, revestido pelo catalizador, platina. Como combustível é usado o hidrogénio, no entanto, o oxidante pode ser ou oxigénio ou ar. As reacções envolvidas neste tipo de pilha de combustível são:



Devido ao facto de se usar ácido fosfórico como electrólito, e tendo em conta que a sua temperatura de solidificação ocorre, aproximadamente, aos 42 ° C, a temperatura de funcionamento da pilha terá que ser elevada. De facto, a melhor performance desta tecnologia ocorre para valores de temperatura entre os 180 – 210 ° C.

A tolerância ao monóxido de carbono no ânodo encontra-se entre cerca de 0.5 – 1.5 %, exigindo assim hidrogénio com uma pureza bastante elevada. De igual forma, a tolerância da pilha ao enxofre, presente geralmente como H₂S, é de aproximadamente 50 ppm.

A eficiência desta tecnologia encontra-se entre 36 - 42%. Devido ao funcionamento da mesma a elevadas temperaturas, pode-se efectuar o aproveitamento do calor gerado, para efeitos de co-geração de energia. Nestas situações, a eficiência pode ser melhorada para valores de 80 -85%.

Depois da percepção do modo de funcionamento deste tipo de pilha de combustível, estamos então em condições de enumerar algumas das suas vantagens e desvantagens. São elas:

Vantagens:

- Tecnologia madura;
- Electrólito pouco dispendioso;
- Performance agradável e longa.

Desvantagens:

- Catalizador de platina caro;
- Susceptível a quantidades reduzidas de monóxido de carbono e enxofre;
- Apresenta como electrólito um líquido corrosivo, sendo necessária a sua renovação durante operação;
- Eficiência eléctrica reduzida.

2.1.4.1.3 PEMFC

O factor determinante deste tipo de pilha de combustível é o facto de possuir um electrólito composto por uma membrana polimérica condutora de protões. Aliás, esse nome gera uma das nomenclaturas usadas em alguma literatura: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell.

Assim, as reacções que ocorrem neste tipo de pilhas são iguais às reacções decorrentes das pilhas do tipo PAFC, fig. 2.1.10 e fig. 2.1.11. A membrana apresenta uma espessura bastante reduzida, entre 20 e 200 μm , é flexível e transparente. Esta membrana é revestida em ambos os lados por uma fina camada de catalizador, baseado em platina, seguida de eléctrodos, que são compostos por carbono poroso. Toda esta compactação, eléctrodo-catalizador-membrana-catalizador-eléctrodo é vulgarmente designada por MEA, ou seja *membrane electrode assembly*. Este conjunto tem, geralmente uma espessura inferior a 1 mm.

Uma das limitações desta tecnologia é a necessidade de hidratar a membrana com água. Como é sabido, esta apenas se encontra no estado líquido até cerca de 100° C. A temperatura de funcionamento deste tipo de pilhas é reduzido, geralmente inferior a 90° C. O facto de este tipo de pilha funcionar a baixas temperaturas, leva a que o único catalizador disponível e conhecido actualmente seja a platina.

Existe actualmente uma segmentação neste tipo bem definida. Como este tipo de pilhas funciona no seu pleno a baixas temperaturas, combustíveis como o metanol e ácido fórmico, podem também ser considerados. Apresentam, actualmente algumas limitações, sobretudo no que diz respeito às potências geradas, que não são geralmente superiores a 1kW. A tecnologia que usa metanol é designada por DMFC, ou seja, *direct metanol fuel cell*. Este tipo de tecnologia está a ser trabalhada sobretudo para equipamentos portáteis, nomeadamente para a electrónica de consumo tais como telemóveis, e computadores portáteis, por exemplo.

As pilhas de combustível PEMFC exibem uma densidade de potência bastante elevada em comparação com outros tipos de pilhas de combustível, geralmente entre 300 e 1000 $mW \cdot cm^{-2}$. Apresentam uma característica bastante agradável no que diz respeito ao arranque, *fast-start*, assim como ao funcionamento on-off.

Esta tecnologia encontra-se, neste momento, bastante madura para o sector de transportes, sendo praticamente exclusiva no sector. As eficiências para este tipo de tecnologia encontram-se entre 50 – 60%. Assim, as principais características desta tecnologia são:

Vantagens:

- Apresenta uma densidade de potência superior;
- Boas capacidades on-off;
- Funcionamento a baixas temperaturas.

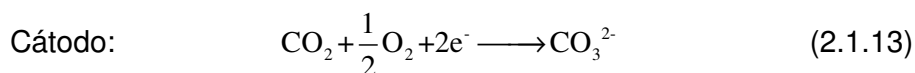
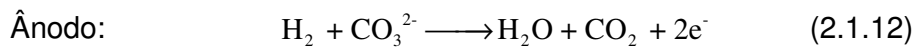
Desvantagens:

- Usa platina como catalizador;
- A membrana polimérica e os componentes auxiliares são dispendiosos;
- Gestão da água na célula quase sempre requerida;
- Pequena tolerância a monóxido de carbono e ao enxofre, devido ao funcionamento às baixas temperaturas.

2.1.4.1.4 MCFC

Esta tecnologia é caracterizada por possuir um electrólito composto por carbonatos fundidos. Tal facto implica, nomeadamente, uma temperatura de funcionamento elevada, geralmente 650°C. Esta situação leva a que uma menor electrocatálise seja requerida, possibilitando, por outro lado, a utilização directa de Gás Natural sem *pré-reforming*. O ânodo é constituído por níquel, enquanto que o cátodo, poroso, é constituído à base de uma liga constituída por óxido de níquel e lítio.

As reacções envolvidas neste tipo de tecnologia são as seguintes:



Como se pode verificar pelas equações acima referidas, a reacção ocorre no cátodo, produzindo, quer dióxido de carbono, quer electrões necessários no cátodo para que a sua reacção ocorra. Assim, no cátodo, mediante a presença destes componentes, são gerados iões de CO_3^{2-} . Estes iões migram através do electrólito, para o ânodo proporcionando os elementos necessários à ocorrência da reacção no ânodo.

A eficiência desta tecnologia ronda os 60%. No entanto, e admitindo sistemas de co-geração de energia, aproveitando, para isso, o calor gerado, pode chegar-se a um rendimento global do sistema entre 70 e 90%, sendo alimentadas a gás natural.

Assim, e mediante a apresentação dos aspectos mais relevantes desta tecnologia, poder-se-á agora enumerar algumas das suas maiores virtudes, assim como os seus defeitos.

Vantagens:

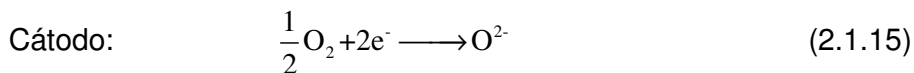
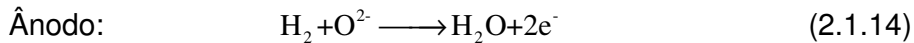
- Flexibilidade no combustível;
- Catalizador de metal não precioso;
- Utilização do calor gerado para aplicações de co-geração.

Desvantagens:

- Rápida degradação dos eléctrodos originada pelas altas temperaturas e ambiente extremamente corrosivo presente na pilha;
- Electrólito líquido;
- Intolerante a contaminantes;
- Densidades de potência reduzidas.

2.1.4.1.5 SOFC

Esta tecnologia caracteriza-se pelo facto de ser construída com um electrólito cerâmico sólido. O mais popular destes é designado por yttria-stabilizes zirconia (YSZ), sendo este, basicamente, um condutor de iões de oxigénio, O^{2-} . As reacções que ocorrem nestas pilhas são as seguintes:



Como se pode verificar, no ânodo é necessária a presença de electrões para se obter como produto o ião O^{2-} . Este ião, por sua vez é necessário do lado do ânodo, para que a reacção ocorra. Nesta situação é de notar, e contrariamente ao que acontece nas pilhas PEMFC, que a água é produzida no ânodo. É importante referir também que este tipo de tecnologia usa materiais diferentes para cátodo e ânodo, nomeadamente no que diz respeito aos eléctrodos. Dado que opera a temperaturas elevadas, nomeadamente entre $600 - 1000^\circ C$, o eléctrodo do combustível, terá que suportar o ambiente de redução a alta temperatura que ocorre no ânodo, enquanto que do lado do cátodo, um ambiente de oxidação a alta temperatura exige diferentes propriedades ao eléctrodo, obrigando-o a ser diferente do eléctrodo do ânodo.

Esta tecnologia possui uma eficiência energética na ordem dos 50 a 60%. No entanto, e efectuando o reaproveitamento do calor gerado, faz com que a eficiência global desta tecnologia possa atingir os 90%. O facto de se operar a elevadas temperaturas, traduz-se em algumas vantagens e desvantagens. Uma vantagem bastante interessante, prende-se com o facto de, visto estarmos a trabalhar a temperaturas elevadas, serem permitidos reagentes com um grau de pureza bastante inferior. No entanto, observou-se que a menores temperaturas, tipicamente entre 400 e 700° C, as desvantagens associadas à alta temperatura praticamente desapareciam, enquanto que as virtudes da tecnologia permaneciam praticamente inalteradas.

Após se verificar um pouco mais em pormenor o funcionamento desta tecnologia, vejamos as vantagens e desvantagens mais evidentes.

Vantagens:

- Flexibilidade no combustível;
- Catalizador de metal não precioso;
- Utilização do calor gerado para aplicações de co-geração;
- Electrólito sólido;
- Densidade de potência elevada.

Desvantagens:

- Problemas devidos ao funcionamento do material a alta temperatura;
- Componentes e fabricação caros;
- Problemas de impermeabilização.

2.1.4.2 Comparação entre as diversas tecnologias

As tecnologias visadas, não se encontram ainda em condições de ser exploradas comercialmente e em larga escala. Em alguns dos casos, como as pilhas de combustível do tipo AFC e PAFC, a sua importância é neste momento meramente histórica. De todas as tecnologias, duas destacam-se claramente pelas perspectivas de futuro que proporcionam, PEMFC e SOFC. Embora não sejam tecnologias preparadas para a comercialização, mostram qualidades para que, num futuro próximo talvez, dêem o salto em termos de investigação. A tecnologia MCFC, proporcionará também uma pilha de combustível a ter em conta. No entanto, algumas das dificuldades encontradas, nomeadamente perdas de electrólito, degradação dos eléctrodos, e baixa densidade de potência, produzem uma diminuição do seu interesse a nível de investigação. No que diz

respeito a aplicações portáteis, as pilhas de combustível do tipo PEMFC, são as únicas que detêm as qualidades necessárias, nomeadamente alta densidade de corrente associada ao funcionamento a baixa temperatura. Neste campo, surge um novo tipo, DMFC, muito popular por sinal, que promete fazer a diferença no que diz respeito a electrónica de consumo, sobretudo.

Em termos de médias potências, ambas as tecnologias, PEMFC e SOFC servem os requisitos, sendo que as pilhas do tipo SOFC são as únicas candidatas para as potências elevadas, nomeadamente, superiores a 250kW.

De uma forma resumida, podemos encontrar na página seguinte, Tabela 2-1, um quadro geral comparativo de todas as tecnologias visadas.

Comparison of Fuel Cell Technologies

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temperature	System Output	Efficiency	Applications	Advantages	Disadvantages
Polymer Electrolyte Membrane (PEM)*	Solid organic polymer poly-perfluorosulfonic acid	50 - 100°C 122 - 212°F	<1kW - 250kW	50-60% electric	<ul style="list-style-type: none"> Back-up power Portable power Small distributed generation Transportation 	<ul style="list-style-type: none"> Solid electrolyte reduces corrosion & electrolyte management problems Low temperature Quick start-up 	<ul style="list-style-type: none"> Requires expensive catalysts High sensitivity to fuel impurities Low temperature waste heat
Alkaline (AFC)	Aqueous solution of potassium hydroxide soaked in a matrix	90 - 100°C 194 - 212°F	10kW - 100kW	60-70% electric	<ul style="list-style-type: none"> Military Space 	<ul style="list-style-type: none"> Cathode reaction faster in alkaline electrolyte so high performance 	<ul style="list-style-type: none"> Expensive removal of CO₂ from fuel and air streams required
Phosphoric Acid (PAFC)	Liquid phosphoric acid soaked in a matrix	150 - 200°C 302 - 392°F	50kW - 1MW (250kW module typical)	80 to 85% overall with combined heat and power (CHP) (36-42% electric)	<ul style="list-style-type: none"> Distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Increased tolerance to impurities in hydrogen Suitable for CHP 	<ul style="list-style-type: none"> Requires platinum catalysts Low current and power Large size/weight
Molten Carbonate (MCFC)	Liquid solution of lithium, sodium, and/or potassium carbonates, soaked in a matrix	600 - 700°C 1112 - 1292°F	<1kW - 1MW (250kW module typical)	85% overall with CHP (60% electric)	<ul style="list-style-type: none"> Electric utility Large distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Can use a variety of catalysts Suitable for CHP 	<ul style="list-style-type: none"> High temperature speeds corrosion and breakdown of cell components Complex electrolyte management Slow start-up
Solid Oxide (SOFC)	Solid zirconium oxide to which a small amount of yttria is added	650 - 1000°C 1202 - 1832°F	5kW - 3MW	85% overall with CHP (60% electric)	<ul style="list-style-type: none"> Auxiliary power Electric utility Large distributed generation 	<ul style="list-style-type: none"> High efficiency Fuel flexibility Can use a variety of catalysts Solid electrolyte reduces electrolyte management problems Suitable for CHP 	<ul style="list-style-type: none"> High temperature enhances corrosion and breakdown of cell components Slow start-up

*Direct Methanol Fuel Cells (DMFC) are a subset of PEM typically used for small portable power applications with a size range of about a subwatt to 100W and operating at 60 - 90°C.

Tabela 2-1: Tabela de comparação das diferentes tecnologias de pilhas de combustível. (Fonte: O'Hayre, R., Cha, S.W., Colella, W., Prinz, F., 2006)

2.1.4.3 Adequação

O objectivo principal deste trabalho reside no desenvolvimento de um sistema de tracção automóvel baseado numa pilha de combustível. Como tal, torna-se necessário, antes de tudo, a adequação de uma tecnologia concreta de pilha de combustível ao problema em questão. Para se efectuar realmente uma decisão em relação à tecnologia a usar, é necessário ter em conta as diversas restrições que, à partida nos são impostas. Neste caso, a pilha de combustível é necessária para fornecer ao motor – que desta feita será eléctrico – toda a potência que este necessite para funcionar correctamente. Assim, e em primeiro lugar, é fulcral saber os valores de potência que esta fonte de energia tem que ser capaz de produzir.

Após a elaboração de alguns cálculos teóricos, presentes no Anexo I, chegou-se à conclusão que o motor, no pior dos casos, necessitará de uma potência fornecida de cerca de 850W. Assim, sabemos já a ordem de grandeza da potência que a pilha terá que fornecer. Sabe-se, também, que um dos intuitos é efectuar um consumo de combustível o menor possível. Assim, o motor só estará ligado quando necessário. Teremos necessidade de usar uma pilha de combustível com boas propriedades on-off assim como um rápido período de arranque. Será desejável um funcionamento a temperaturas não muito elevadas.

Com todos estes argumentos, a única tecnologia que satisfaz tais condições é a PEMFC. Após a escolha recair sobre esta tecnologia, é agora necessário averiguar se a tecnologia DMFC, poderá ou não, ser adequada a este caso. Algumas razões levam a que esta não se adeque a este caso, nomeadamente o facto de ainda não estar bem desenvolvida e de não existir, neste momento, um módulo capaz de proporcionar tais potências eléctricas. Por outro lado, este veículo tem como objectivo a sua inserção numa prova anual denominada “Shell Eco-Marathon”, sendo que o Metanol não é sequer um combustível autorizado.

2.1.5 Produtos existentes no mercado

Seguidamente, serão apresentados os diversos produtos existentes no mercado, mediante um conjunto de especificações.

2.1.5.1 Características necessárias

Após a escolha do tipo de pilha de combustível ter recaído sobre as pilhas do tipo PEMFC, e sabendo também a ordem de grandeza de potencia que esta tem que fornecer, foi elaborado um estudo de mercado, para se verificar quais os produtos que preenchem os requisitos. Assim, os principais requisitos necessários são:

- Ser do tipo PEMFC;
- Potência fornecida entre 800W e 1kW;
- Mínimo consumo;
- Peso e volume reduzidos;
- Permita o ar como oxidante e sem armazenamento (imposição da organização);
- Máxima eficiência.

2.1.5.2 Ofertas

No que diz respeito aos produtos existentes no mercado, e depois de uma extensiva pesquisa, reduziu-se a quantidade de opções a três. Tal facto deveu-se, sobretudo, a se ter introduzido à cabeça um conjunto de restrições. Estas medidas contribuirão, à partida, para a eliminação de algumas ofertas devido ao facto de não cumprirem uma ou mais das especificações necessárias. Como exemplo de dispositivos que não cumpriam os requisitos, encontram-se o modelo FC-038K-11 da H₂Economy, que apresenta apenas uma potencia de cerca de 500W, assim como uma tensão de saída de aproximadamente 9V, e os modelos de pilha de combustível da NedStack, que o circuito que oferecia menor potencia era de 2kW, assim como tinha uma massa demasiado exagerada, 19kg. Assim as três ofertas mais relevantes serão discutidas de seguida.

2.1.5.2.1 *Heliocentris, Fuel Cell System Solution FC-42*

O aspecto visual desta pilha encontra-se na Figura 2.5. Este módulo permite a geração de 360W, obtendo uma saída de cerca de 24V. É composto por 42 células e, de modo a se obterem potências superiores, é apenas necessária a interligação entre vários módulos. Apresenta um peso de cerca de 6kg, e dimensões de 130 x 155 x 190 mm. No que diz respeito ao funcionamento da pilha quando aglomerada, não existem indicações no sentido de clarificar alguns

pormenores tais como a eficiência, consumos, entre outros. O preço desta pilha toma valores unitários entre US\$1500 – 1600. Como neste caso, seriam necessários três módulos o valor final rondaria cerca de US\$4500 – 4800. Será, no entanto, de salientar, que esta oferta necessita ainda de alguns componentes adicionais, nomeadamente, controlo do fluxo de reagentes e sistema de refrigeração, entre outros. Tal situação trará custos adicionais aos montantes referidos.



Figura 2.5: Modelo FC-42 da Heliocentris. (Fonte: www.heliocentris.com)

Os pontos mais positivos e os pontos menos fortes são, respectivamente:

Pontos a favor:

- Modularidade, permitindo obter diferentes configurações;
- Relativamente leves;
- Facilidade em produzir pilhas customizadas.

Pontos contra:

- Necessidade de desenvolvimento de mecanismos externos para o correcto funcionamento;
- Controlos externos poderão levar ao decréscimo da eficiência da pilha.

2.1.5.2.2 Ballard Power Systems, Nexa® Power Module

O módulo denominado Nexa® Power Module, da Ballard Power Systems, é comercializado pela Heliocentris. O seu aspecto pode ser consultado na Figura 2.6.



Figura 2.6: Nexa® Power Module, da Ballard Power Systems. (Fonte: www.heliocentris.com)

Este módulo foi criado propositadamente para desenvolvimento e investigação. Assim, permite algumas funcionalidades, sobretudo via software, onde é possibilitado verificar diversos parâmetros. Apresenta uma tensão de saída em cerca de 26V, conseguindo produzir uma corrente de cerca de 46A. Assim, consegue alcançar praticamente 1200W de potência. Apresenta um consumo máximo de 18.5 L/min em condições de temperatura e pressão standard. Quanto ao preço, este equipamento tem um valor que ronda os 10 a 12 mil euros. As suas dimensões são 56 x 25 x 33 cm, e tem como massa cerca de 13kg. Neste caso, este é já um produto bastante completo, autónomo, sendo apenas necessário combustível para poder funcionar.

As principais vantagens e desvantagens deste produto a ter em conta são:

Vantagens:

- Produto completamente funcional e autónomo;
- Disponibilização de software que permite a visualização de várias variáveis do sistema;
- Existência de variadas opções para se conjugar com o módulo básico (conversores DC-DC, por exemplo);
- Ideal para trabalho de investigação;

Desvantagens:

- Preço elevado;
- Peso e dimensões excessivas;

2.1.5.2.3 Horizon, H1000

Lançado recentemente no mercado, este modelo da Horizon, apresenta características bastante atractivas. O seu aspecto visual está presente na Figura 2.7:



Figura 2.7: Modelo H1000, comercializado pela Horizon. (Fonte: www.horizonfuelcell.com)

Esta pilha é composta por 64 células e apresenta à sua saída uma potência nominal de 1000W. Este valor é conseguido para uma tensão de 36V, fornecendo uma corrente de cerca de 30A. Possui incluído um sistema de auto humedecimento da membrana, e a refrigeração é feita à custa do ar que circula pela actuação de uma ventoinha. Estes processos são efectuados de forma autónoma. A pilha apresenta um peso de cerca de 5.5kg, e as suas dimensões são 315 x 92 X 210 mm. Os seus consumos são de 14 L/min e tem uma eficiência global de 45%. No final de contas, o valor deste produto é de cerca de US\$4000 (17 de Fevereiro de 2009).

Estas características levam aos seguintes juízos:

Vantagens:

- Produto completamente funcional e autónomo;
- Valores de massa e dimensão reduzidos;
- Consumos relativamente reduzidos;
- Preço atractivo.

Desvantagens:

- Eficiência intermédia.

2.1.5.3 Comparação e selecção

Efectivamente, todas as soluções apresentadas possuem características indispensáveis aos objectivos propostos. No entanto, uma seriação pode ser efectuada.

O modelo FC-42 da Heliocentris, embora detenha algumas características interessantes, apresenta desvantagens que colocam os restantes produtos numa hierarquia superior. O facto de todo o controlo do sistema ser efectuado de forma externa ao produto, leva a perdas de eficiência. Comparando com os demais produtos, o preço é também uma questão a ter em conta. Efectivamente, a pilha de combustível da Horizon apresenta melhores características e, enfim, num preço em tudo semelhante. Assim, este modelo é descartado à partida.

No que diz respeito aos dois restantes equipamentos, existe agora um certo equilíbrio no que diz respeito às características técnicas. No entanto, a oferta que no global apresenta as melhores condições é, sem dúvida, a pilha da Horizon. Além de ser mais pequena e possuir um peso inferior, consegue obter menores consumos e aproximadamente a metade do preço do módulo Nexa.

O facto de o módulo da Nexa ser mais didáctico seria uma mais valia para o trabalho com a pilha de combustível. No entanto, e dado que se pretende um produto cuja competitividade seja acima de tudo, no campo da eficiência, torna-se natural que a escolha recaia sobre a pilha H1000 da Horizon.

2.2 Motores eléctricos

Ao longo deste sub-capítulo são abordados os aspectos directamente ligados aos motores eléctricos. Assim, inicialmente são focados os princípios físicos envolvidos nos mesmos. De seguida, são enunciados os diversos tipos de motores eléctricos, bem como uma caracterização de cada um deles. Será efectuada uma adequação e escolha de um desses tipos, afim da implementação do trabalho em questão. Por fim, e após a abordagem de uma panóplia de modelos que se enquadram com as especificações, é efectuada a escolha de um produto comercial.

2.2.1 Princípios físicos

Um motor eléctrico é um dispositivo que, na sua generalidade, tem como função transformar energia eléctrica em energia mecânica. O princípio básico de funcionamento recai sempre nos conceitos físicos relacionados com o electromagnetismo. Assim, são alguns pontos a deter:

- Pólos iguais repelem-se, enquanto que pólos diferentes se atraem;
- As forças de atracção e repulsão são iguais, desde que quer a intensidade dos pólos, quer distância assim como a sua distribuição espacial seja igual;
- Os pólos existem sempre aos pares (norte e sul), sendo que as linhas de campo magnético partem sempre do pólo norte para o pólo sul. Não existem, portanto, unipólos no seu sentido lato.

- As linhas de força nunca se cruzam. Num ambiente onde coexistam mais que uma fonte, então as linhas de força conjugam-se, contribuindo, cada uma delas para uma distribuição final das linhas de força.

Os pontos anteriores são válidos, qualquer que seja a fonte, ou seja, quer os pólos sejam criados por magnetos permanentes, ou por uma bobina, por exemplo (Tipler, P.A., Mosca, G., 2006).

De seguida, na Figura 2.8, representam-se as linhas de força criadas por dois pares de pólos. No primeiro caso, pólos com o mesmo sinal encontram-se frente a frente. No segundo caso, porém, pólos de sinais diferentes encontram-se alinhados.

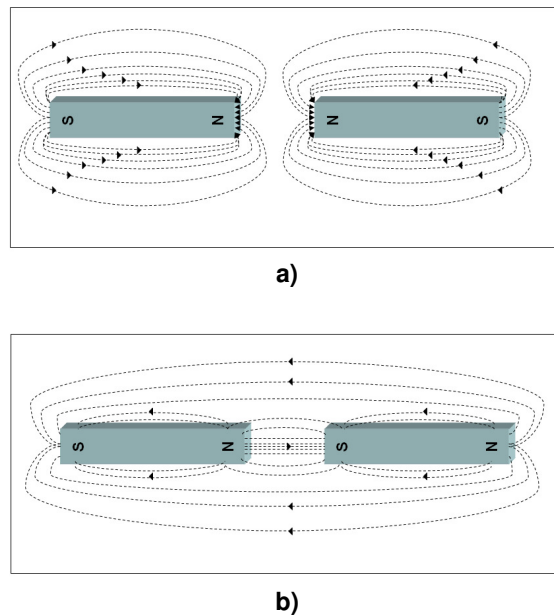


Figura 2.8 – Representação da interacção das linhas de força provocadas por dois pares de pólos: a) Pares de pólos com pólos iguais frente a frente; b) Pares de pólos com pólos diferentes frente a frente. (Fonte: Gottlieb, I.M., 1994)

Um motor eléctrico, dependendo da sua complexidade, é composto por variados segmentos. No entanto, em qualquer dos tipos, existe sempre uma parte fixa, designada por estator, e uma outra móvel, designada por rotor. Geralmente, o rotor situa-se no interior do estator, embora o caso contrário também seja encontrado. Mediante os princípios de construção de cada tipo de motor será necessária a implementação de alguns componentes extra. Esses mesmos componentes serão apresentados, especificamente aquando da descrição de cada tipo de motor.

De modo a provocar rotação de um motor eléctrico, dever-se-á controlar os pólos magnéticos criados ao longo do tempo, produzindo assim binário. Existem, no entanto, variadas técnicas que possibilitam criar a rotação de um motor. Nesse sentido, surgem vários tipos de motores, que, devido ao seu princípio de construção estarão mais indicados para certas aplicações e não tão indicados para outras. Os vários tipos de motor serão abordados de seguida.

2.2.2 Tipos de motores eléctricos

Tradicionalmente, é habitual agrupar os motores eléctricos em dois grandes grupos: Motores AC, e Motores DC. Esta distinção, porém, não é a mais correcta, dado que, na realidade, existem motores que operam em AC, e que são considerados DC, tal como o motor universal ou brushless. Existem também alguns agrupamentos efectuados no que diz respeito à potência, entre outros. Mais importante que fazer uma distinção rígida, será perceber efectivamente, as vantagens e desvantagens que os diferentes tipos de motores eléctricos proporcionam, afim de uma selecção pelo mais adequado.

2.2.2.1 Motor indução

Este tipo de motor é em termos gerais, o motor mais usado (Santos, D.G., 2006). Existe uma diversidade elevada dependendo da potência, carga, eficiência e fiabilidade necessárias.

O seu nome advém do método como a transferência de potência entre o estator e o rotor ocorre. Quando existe um movimento relativo entre os campos magnéticos criados no estator e rotor, é induzida uma tensão no motor. Esta tensão induzida gera corrente, que por sua vez interage com o campo magnético presente no estator de modo a produzir binário.

O rotor pode ser construído por enrolamentos de modo semelhante ao estator. Estes enrolamentos podem ser ligados a resistências externas quer para controlar a corrente de arranque, quer, por outro lado, para controlo de velocidade.

Por sua vez, o estator é caracterizado por possuir um número par de pólos magnéticos. De modo a se proporcionar um campo magnético rotativo terá que existir pelo menos, a cada instante, dois caminhos de corrente. Estes deverão estar desfasados entre si, de modo a que sejam exibidas tensões de pico em instantes diferentes.

De acordo com o que foi dito anteriormente, de modo a haver tensão induzida no rotor, é necessário que o motor rode a uma velocidade inferior ao campo magnético rotativo criado no estator. O campo magnético proporciona a velocidade limiar, geralmente enunciada de velocidade síncrona:

$$V_0 = \frac{60 \cdot f}{p/2} (rpm) \quad (2.2.1)$$

Em que,

V_0 é a velocidade síncrona;

f é a frequência da tensão aplicada ao motor, e

p é o número de pólos.

Tipicamente existem dois métodos para o controlo da velocidade deste tipo de motor. Um deles consiste no controlo da tensão aplicada ao mesmo, enquanto que o outro método consiste no controlo da frequência. No entanto, quando é pretensão implementar um controlo cujo intervalo de velocidades seja elevado, então o método por controlo da frequência será desejável.

No que à eficiência diz respeito, esta depende, essencialmente, de dois factores: preço e potência. Por um lado, motores que proporcionam potências mais elevadas possuem, geralmente, eficiências superiores. Por outro, para uma mesma potência, um incremento do preço do motor é, de modo geral, sinónimo de uma eficiência superior (Engelmann, R.H., Middendorf, W.H., 1995).

2.2.2.2 Motor AC síncrono

Este tipo de motor é geralmente desenhado para funcionar a tensão e frequência constantes. Porém, o número de dispositivos que funcionam a frequência variável tem vindo a crescer. Estes motores são desenhados para funcionarem com fontes polifásicas, sendo que a fonte trifásica, é indubitavelmente a mais usual. Geralmente, possui os enrolamentos no estator e estes encontram-se ligados de modo a gerar o número de fases e pólos apropriados (Engelmann, R.H., Middendorf, W.H., 1995).

No caso mais geral, a velocidade gerada será:

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \quad (2.2.2)$$

Em que,

f é a frequência da fonte, em Hz;

p , o número de pólos criado no motor;

n , a velocidade síncrona, em rpm.

Será de salientar que os enrolamentos estão sempre distribuídos de modo a maximizar os fluxos magnéticos criados. No caso de uma fonte trifásica, por exemplo, os enrolamentos estão espaçados de 120° .

A fonte polifásica é geralmente aplicada ao estator, sendo que o rotor pode ser constituído por magnetos permanentes, ou por enrolamentos. Neste último caso, o campo magnético é geralmente provocado por uma fonte DC externa. Em qualquer dos casos, o campo magnético criado é estacionário, relativamente ao rotor (Santos, D.G., 2006).

Dado que o binário médio só é gerado quando os campos criados no rotor e estator são estacionários, então este motor só opera de forma síncrona à sua velocidade síncrona, sendo que, a outras velocidades, não é gerado binário. Uma forma de contornar tal situação, será actuá-lo como um motor de indução até que a sua velocidade seja próxima da velocidade síncrona.

2.2.2.3 Motor DC

O nome deste tipo de motor provém da forma como obtém energia. Em termos físicos, é caracterizado por possuir um estator composto por enrolamentos ou magnetos permanentes. A sua função específica passa por criar pólos magnéticos estáticos. Por sua vez, o rotor é constituído por enrolamentos, sendo que estes têm que alterar o sentido da corrente dos mesmos, de modo a alterar os pólos criados nos mesmos, produzindo assim binário. De facto, este será apenas produzido caso os campos magnéticos criados quer no estator quer no rotor permaneçam estacionários um em relação ao outro (Palma, J.C., 1999).

A inversão da corrente nos enrolamentos do rotor é efectuada com o auxílio de um circuito externo. Este circuito de comutação usa, tipicamente, escovas que asseguram a comutação de forma mecânica. O uso de escovas implica um desgaste das mesmas por fricção, ao longo do tempo. De facto são criadas faíscas aquando da rotação. A conjugação destes factos implica uma diminuição quer da eficiência do motor, quer do tempo de vida do mesmo.

Relativamente ao modo como são efectuadas as ligações dos enrolamentos do estator com os enrolamentos do rotor, vários são os motores DC proporcionados. Nesse sentido, surgem diversas variantes. Serão de seguida referidos alguns dos motores DC mais usados, sendo abordadas levemente as suas características (Santos, D.G., 2006), (Engelmann, R.H., Middendorf, W.H., 1995).

- Motor DC com excitação série

O nome advém da forma como os enrolamentos do indutor e induzido estão ligados. Assim, a corrente que passa no indutor e induzido será a mesma. Este motor apresenta um binário de arranque bastante elevado, sendo, por isso, adequado a aplicações de tracção.

A velocidade exibida por este tipo de motor, depende de forma aproximadamente linear da tensão a ele aplicada.

- Motor DC paralelo

Neste tipo de motor, o indutor e induzido, encontram-se ligados em paralelo, sendo que a tensão aplicada a ambos é a mesma. Para este tipo de motor, quando alimentado por uma tensão constante, a velocidade que atinge diminui à medida que o binário necessário é incrementado. Por outro lado, para um mesmo binário, à medida que se aumenta a tensão aplicada ao motor, está-se, de facto, a diminuir a velocidade que este atingirá.

- Motor DC de excitação separada

No motor DC de excitação separada, o indutor e o induzido são, de facto, excitados por fontes diferentes. A velocidade deste motor pode ser ajustada, quer por variação da tensão aplicada no induzido, quer por variação da corrente aplicada ao indutor, quer por ambos os métodos. Assim, para um mesmo binário, a tensão aplicada ao motor interfere linearmente na velocidade que este atinge. Por outro lado, à medida que o binário exigido pela carga aumenta, a velocidade no motor diminuirá ligeiramente, muito por culpa da queda de tensão no induzido, provocada pela resistência parasita do mesmo.

- Motor universal

O motor universal herda este nome, precisamente pelo facto de poder ser actuado quer por corrente DC, quer AC. De facto, este tipo de motor, em termos estruturais, não é mais que um motor DC do tipo série. Como os enrolamentos do induzido e do indutor estão em série, então a inversão do sentido da corrente é transparente a ambos. Assim, o motor universal roda sempre no mesmo sentido, independentemente do sentido da corrente.

Em relação ao motor DC série, existem duas diferenças significativas. Dado que o fluxo no motor não é constante, há necessidade de folhear o núcleo ferromagnético do estator. Tal situação não acontece, geralmente, no motor DC

série, dado que o fluxo produzido é constante. Por outro lado, de modo a fornecer uma mesma potência, o motor universal necessita de uma corrente superior, devido à queda indutiva, quando actuado por uma fonte alternada.

2.2.2.4 Motores DC sem escovas (Brushless)

Este tipo de motor é caracterizado por operar com fonte DC, sem recorrer ao uso de escovas, contrariamente aos tradicionais motores DC. São usados geralmente quando o controlo de binário, velocidade ou posição são desejados. É caracterizado por possuir os enrolamentos no estator, enquanto que o rotor é constituído por magnetos permanentes.

Devido ao facto de ser alimentado a uma fonte DC, o seu controlo, tem que ser efectuado electronicamente. O controlo faz-se decidindo, a cada altura, quais os enrolamentos que conduzem, ou não. É, no entanto, de salientar que para além de se efectuar o controlo da corrente em cada enrolamento, é também necessário controlar a direcção da mesma. O processo de comutação de corrente nos enrolamentos é passível de ser executado com, ou sem, o auxílio de sensores (Yedamale, P., 2003).

O papel executado pelo controlador, é em tudo semelhante à tarefa executada pelas escovas num motor DC, sendo que num caso, a comutação é electrónica e no outro mecânica, respectivamente. O facto de se abdicar das escovas, faz com que a durabilidade deste tipo de motor seja, efectivamente, superior aos motores DC convencionais. Paralelamente, a eficiência deste tipo de motores é também incrementada, dado que abdica de contactos mecânicos.

Os custos inerentes a um controlador deste género têm que ser tomados em conta, no que diz respeito ao valor final de todo o sistema.

2.2.3 Adequação

No que diz respeito à escolha de um motor para uma determinada aplicação deve-se ter em atenção vários aspectos. É necessário, antes de mais, assegurar que o tipo de motor escolhido cumpre os requisitos essenciais ao sistema a implementar. Assim, será de salientar que se pretende criar um sistema capaz de variar a velocidade de rotação. Por outro lado, inserindo o motor no sistema global, constata-se que este terá que ser alimentado integralmente pela pilha de combustível seleccionada anteriormente.

Os tipos de controlo de velocidade eficientes nos motores AC efectuem-se alterando a frequência da tensão de alimentação. Por outro lado, a variação de velocidades em motores DC é bastante mais acessível.

Assim, a escolha recai sob um motor DC. Neste caso, surge mais uma dificuldade que se prende com o tipo de motor DC a escolher. Neste campo existem dois tipos que proporcionam as condições impostas, o motor DC convencional e o motor DC Brushless. O comportamento de ambos é bastante semelhante, sendo que a decisão tem que ser apoiada em variáveis diferentes.

As variáveis ponderadas que sustentaram a decisão foi a eficiência e o preço. Um motor Brushless, dado que não necessita de escovas para efectuar a comutação da corrente no rotor, apresenta uma eficiência superior. Esse incremento na eficiência é tanto maior quanto maior for a potência do mesmo. Em termos de necessidade de potência, será necessário um motor que proporcione 850 W de potência máxima de modo a atingir todos os requisitos. Em termos médios, no entanto, a potência necessária será bastante inferior, sendo que se considerou motores capazes de proporcionar uma potência média entre [200, 400] W.

A este nível, foram então abordados vários motores. No entanto, devido às especificações, a selecção cingiu-se a apenas dois motores. Um DC convencional, e o outro, DC Brushless. Uma tabela de especificações de cada um destes motores será mostrada de seguida.

- **Motor DC**

A Tabela 2-2 apresenta as características principais deste motor.

<i>Values at nominal voltage</i>	<i>Units</i>	<i>Value</i>
Nominal voltage	V	24
Nominal Power	W	250
No load speed	rpm	3880
No load current	ma	647
Stall torque	mNm	16800
Starting current	A	297
Max. Efficiency	%	84.3
Weight	g	2480
Price	€	526.51

Tabela 2-2 – Principais características do motor DC. (Fonte: Maxon Motor)

- **Motor DC Brushless**

A Tabela 2-3 apresenta as características principais do motor Brushless.

<i>Values at nominal voltage</i>	<i>Units</i>	<i>Value</i>
Nominal voltage	V	24
Nominal Power	W	250
No load speed	Rpm	5250
No load current	Ma	435
Stall torque	mNm	2420
Starting current	A	55.8
Max. Efficiency	%	84
Weight	g	1150
Price	€	421.64

Tabela 2-3 – Principais características do motor DC Brushless. (Fonte: Maxon Motor)

Comparando as diversas características dos motores supracitados, é possível verificar algumas disparidades entre algumas características. O motor DC com escovas apresenta um binário de arranque muito elevado, quando comparado com o motor Brushless. O mesmo se repercute na corrente fornecida ao mesmo. Assim, a corrente de arranque do motor Brushless será mais indicada ao tipo de fonte usada. Em termos de peso, verifica-se que este mesmo motor é mais leve que o motor de escovas. O preço de ambos é, também, bastante díspar, sendo que o Brushless é menos dispendioso. No entanto, o preço do controlador para este deve ser tomado em conta no preço final. Da mesma forma, o tempo de vida de um motor Brushless será, à partida superior ao DC, dado que não possui escovas. A escolha recaiu, então, sobre o motor DC Brushless. O modelo do motor é EC-45, 136207 da Maxon Motor.

3 Controlo motor

Ao longo deste capítulo, serão abordados, de forma mais aprofundada, as características principais de um motor do tipo DC Brushless. Depois de serem expostos os diversos tipos de controlo passíveis de se utilizarem neste contexto, será apresentada uma proposta para um controlador. Nessa altura serão abordadas as dificuldades encontradas ao longo do projecto do mesmo, bem como as soluções encontradas.

Por outro lado, é apresentado o protocolo de comunicação implementado no controlador, bem como a interface gráfica, responsável por proporcionar a visualização das variáveis de sistema de forma continuada.

3.1 *Tipos de controlo*

Relativamente aos motores DC Brushless, vários controlos podem ser efectuados. Mediante o motor já escolhido para a aplicação e pela sua especificidade, alguns pontos devem ser tomados em conta.

Como já foi referido, o modo de fazer um motor do tipo Brushless rodar consiste em controlar, a cada instante, quais os enrolamentos que conduzem, assim como a direcção da corrente nos mesmos (Yedamale, P., 2003).

De um modo geral, a cada instante, e no caso de haver três enrolamentos – caso mais frequente – apenas dois desses enrolamentos podem estar activos, sendo que num deles a corrente tem um sentido e, no outro, terá o sentido oposto. O enrolamento restante ficará em aberto, ou seja, nele não atravessará

corrente. A Figura 3.1 mostra a direcção das correntes possíveis para um motor de três enrolamentos.

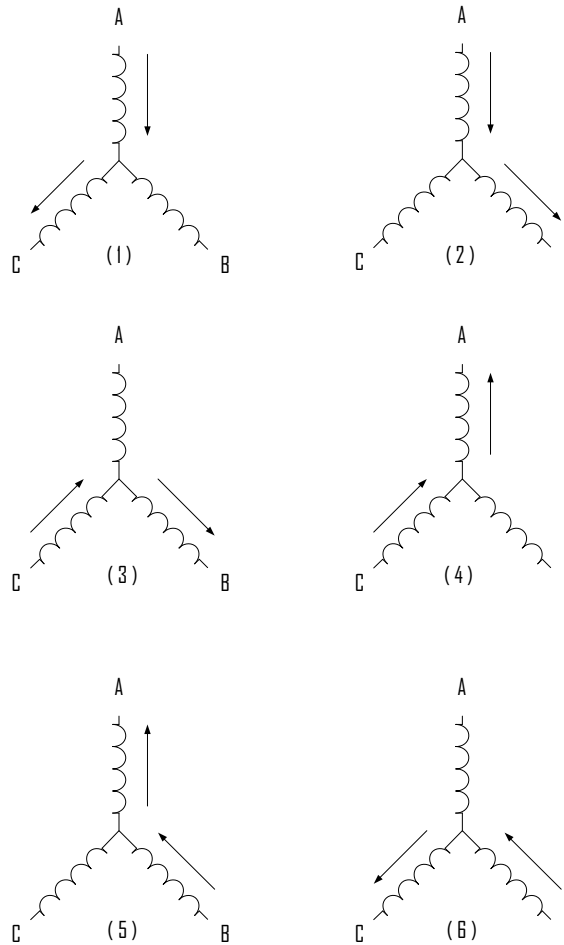


Figura 3.1 – Esquema representativo da direcção da corrente presente em cada enrolamento, para os diversos estados possíveis. (Fonte: Yedamale, P., 2003)

Ao se induzir correntes nos enrolamentos, está-se de facto, de acordo com as leis físicas, a criar um campo electromagnético. Tal situação cria pólos magnéticos com sinais diferentes, nas duas extremidades de cada enrolamento. A criação de pólos magnéticos no estator faz com que os magnetos permanentes do rotor se alinhem perante estes.

A figura apresentada anteriormente serve apenas para ilustrar a direcção da corrente que deve ser proporcionada a cada enrolamento, de modo a que o motor rode numa determinada direcção. Num motor real, porém, a configuração e disposição de cada um dos enrolamentos é, geralmente, efectuada de forma um pouco diferente daquilo que a Figura 3.1 pode transparecer. A Figura 3.2 ilustra, então, a verdadeira disposição dos enrolamentos no motor.

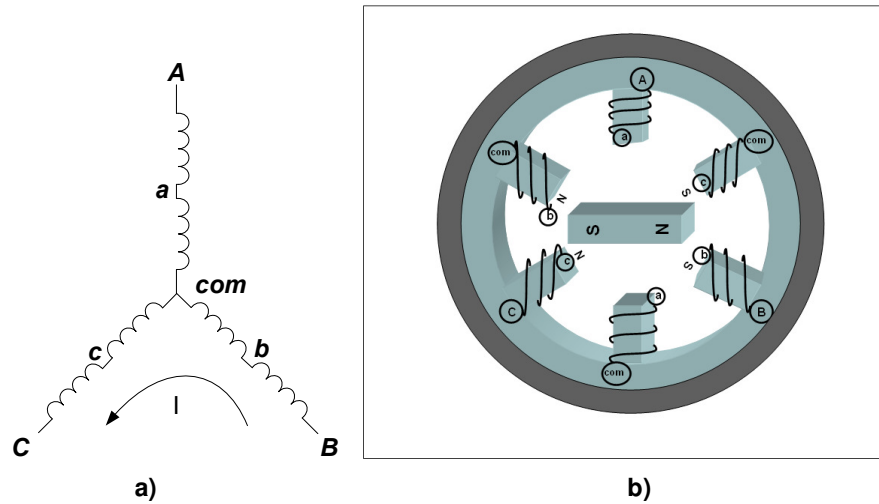


Figura 3.2 – Representação de um estado do motor com indicação da organização dos enrolamentos: a) Formato de ligação dos enrolamentos e direcção da corrente; b) Representação física do motor, com indicação dos campos magnéticos criados, usando o estado representado em a). (Fonte: Brown, W., 2002)

De modo a facilitar a visualização, usou-se um modelo específico com três enrolamentos e um par de pólos no rotor. Como se pode verificar, cada enrolamento é constituído, no fundo, por dois mais pequenos ligados entre si. Através da Figura 3.2b) é possível verificar a forma como cada um desses enrolamentos é disposta no motor.

Assim, cada enrolamento preenche um espaço no motor que começa num determinado local e acaba no lado diametralmente oposto. Usando a sequência presente na Figura 3.1, verifica-se que o rotor é forçado a rodar, de modo a se manter sempre alinhado com os pólos entretanto criados nos enrolamentos. Será também de salientar que é possível controlar a direcção de rotação do motor, bastando para isso inverter a sequência de enrolamentos activos a cada instante.

Por outro lado, dado que a corrente nos enrolamentos é controlada, e devido ao facto de o rotor e o estator serem síncronos entre si, é possível – para além de controlar o motor, com o intuito de o fazer rodar – fazer variar a velocidade a que o mesmo rodará. Nesse sentido, haverá dois níveis de abstracção no que toca ao controlo de um motor deste género. Um, diz respeito à rotação em si, e outro, diz respeito ao controlo da velocidade. Nesta lógica, faz todo o sentido abordar estes conteúdos separadamente.

3.1.1 Rotação

Para efectuar o controlo da rotação do motor, existem, tipicamente, duas técnicas diferentes. Uma usa sensores para decodificar a posição relativa do rotor, em relação ao estator. Por esse facto, este tipo de controlo é designado habitualmente por *Sensored*. Por outro lado, o outro tipo de controlo é designado geralmente por *Sensorless*. O nome advém do facto de não serem usados directamente sensores para medir a posição relativa do motor.

De seguida serão abordadas cada uma das técnicas.

3.1.1.1 *Sensored*

Como já foi referido anteriormente, este tipo de controlo prima pelo uso de sensores capazes de retornar a posição do rotor relativamente ao estator de forma continuada. Assim, e mediante o sentido de rotação e posição devolvida, é possível saber, quais os enrolamentos a serem activados a cada momento (Brown, W., 2002).

No que diz respeito aos sensores em si, é comum usar-se dois tipos de sensores distintos. Embora o objectivo final seja semelhante, o princípio de construção dos mesmos é bastante diferente. Esses mesmos sensores são:

- Encoder
- Tacómetro por efeito de Hall

3.1.1.1.1 *Encoder*

O encoder é um dispositivo que, na sua generalidade, é capaz de providenciar medições de velocidade e, muitas vezes, direcção e posicionamento de um motor. É caracterizado por proporcionar essa mesma detecção sem efectuar contacto com o mesmo. Como consequência, não existe desgaste de peças por contacto, nomeadamente escovas, aumentando a longevidade dos dispositivos.

O funcionamento do mesmo baseia-se no uso de discos ópticos perfurados. Estes estão acoplados ao veio do motor. Por outro lado, é usada uma fonte luminosa, e um receptor que gera um trem de impulsos, à medida que o conjunto emissor receptor fica sem obstáculos (Fonseca, P., 2007).

Este mesmo procedimento, pode ser verificado na Figura 3.3.

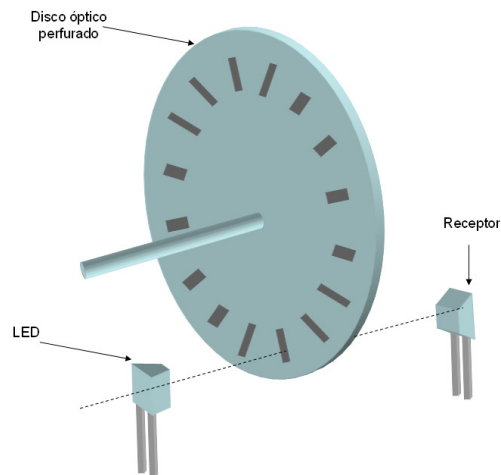


Figura 3.3 – Esquema representativo do funcionamento de um encoder. (Fonte: Fonseca, P., 2007)

Existem, de modo a proporcionar diferentes valências, dois tipos de encoders. O encoder incremental e o encoder absoluto. O primeiro gera impulsos aquando da rotação do motor. Não permite, portanto, determinar a posição do motor, nem, tampouco o sentido de rotação. Porém, o encoder incremental de duas fases permite contornar estes problemas, usando sinais em quadratura. A resolução destes encoders é geralmente dada em número de impulsos por rotação.

O segundo é constituído por vários pares emissor/receptor. Assim, permitem de facto determinar quer a direcção de rotação, como a velocidade e posição de um motor. Nesse sentido, embora dependendo da aplicação, o seu comportamento é bastante mais atractivo que o encoder incremental. De seguida, na Figura 3.4 é apresentada uma figura que ilustra o aspecto dos discos ópticos perfurados de ambos os tipos de encoders abordados.

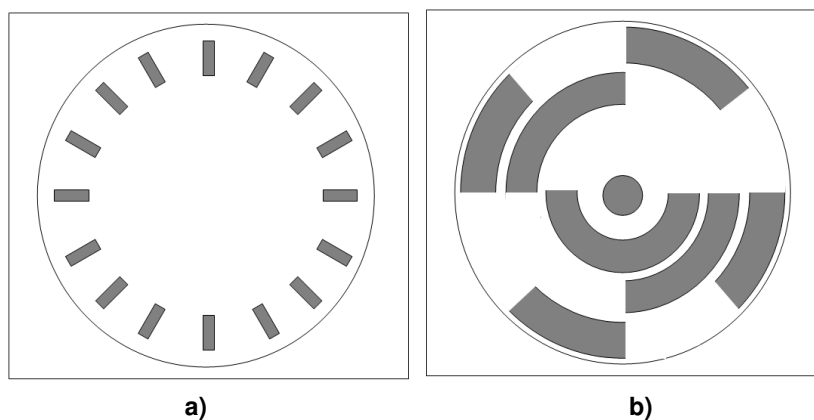


Figura 3.4 – Aspecto físico dos discos ópticos perfurados de um encoder: a) Incremental; b) Absoluto. (Fonte: Fonseca, P., 2007)

Olhando em pormenor para o disco perfurado de um encoder em quadratura, situação visualizada na Figura 3.4b), é possível verificar que a posição do motor é obtida pela leitura dos sinais provenientes dos diversos pares emissor/receptor, que proporcionam codificações únicas para cada posição. A resolução do encoder será tanto maior, quanto maior for o número de pares emissor/receptor. Assim, num caso geral, a resolução em graus para um encoder absoluto será:

$$Res = \frac{360}{2^N} (^\circ) \quad (3.1.1)$$

Em que,

Res é a resolução, em graus, do encoder;

N é o número de pares emissor/receptor que os mesmos possuem.

Para o caso concreto em que $N=2$, a resolução do encoder será de $Res=90^\circ$. Tal facto indica que, num espaçamento de 90° , o valor devolvido pelo encoder será o mesmo.

Por outro lado, é possível obter a velocidade através da frequência de alteração dos sinais devolvidos pelo encoder. Por fim, o sentido de rotação é obtido verificando dois estados contíguos.

No que diz respeito à medição da velocidade, é de salientar que, alguns produtos têm ainda um outro sinal que tipicamente gera um impulso a cada rotação completa, facilitando a medição da mesma.

3.1.1.1.2 Tacómetros por efeito de Hall

Estes dispositivos baseiam-se no elemento de Hall e podem ser acoplados sem efectuar qualquer contacto com o motor (Tipler, P.A., Mosca, G., 2006). Este tipo de sensores é muito comum, e existe em pequenos circuitos integrados, o que facilita a sua inclusão no motor (Lepkowski, J., 2003).

Por outro lado, possuem, geralmente, acondicionamento de sinal, proporcionando uma ligação dos mesmos directamente a um microcontrolador, por exemplo. Esse acondicionamento é feito, geralmente, usando comparadores ou Schmitt Trigger, sendo que possuem sinais digitais à saída.

Uma possível implementação deste dispositivo para se efectuar o controlo de um motor do tipo Brushless, encontra-se na Figura 3.5.

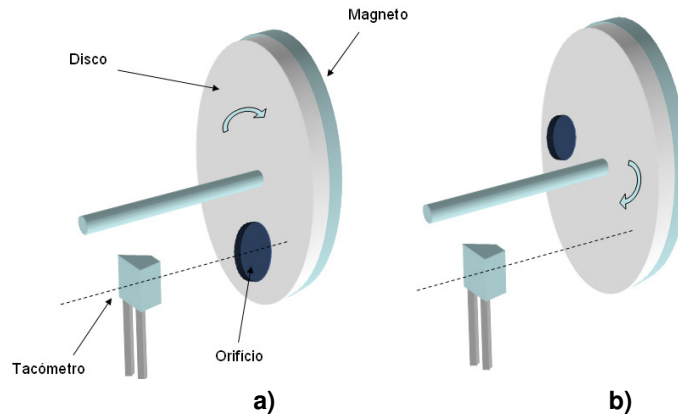


Figura 3.5 – Esquema do funcionamento de um Tacómetro por efeito de Hall: a) Magneto alinhado com tacómetro; b) Disco entre magneto e tacómetro. (Fonte: Lepkowski, J., 2003)

Como se pode verificar, ambas as imagens são compostas por um sensor, um ímã e, entre estes, um material que não permite a passagem de campos electromagnéticos, chamado aqui de disco. Esse mesmo material possui um ou vários orifícios.

Quando o ímã se encontra em linha com o sensor, situação mencionada na Figura 3.5a), o campo magnético criado pelo ímã é presenciado pelo sensor, sendo que a sua saída se activa. Porém, quando o disco se encontra entre o ímã e o sensor, interrompe-se o campo magnético presenciado por este, e, conseqüentemente, a saída digital do sensor é colocada a zero lógico, situação evidenciada na Figura 3.5b).

Mediante as características deste tipo de sensor, verifica-se que este é passível de ser usado para detecção de posição, medição de velocidades, assim como controlo da direcção.

3.1.1.2 Sensorless

O método abordado diferencia-se do método anterior precisamente por não usar sensores para efectuarem o controlo da rotação e é usado eminentemente nos motores DC Brushless.

Este tipo de controlo baseia-se no facto de ser criada uma força contra electromotriz aquando da rotação do motor. Dado que a cada instante, apenas dois enrolamentos estão a conduzir, usa-se o outro enrolamento para medir essa mesma força, que se repercute numa tensão gerada no enrolamento (Brown, W., 2002).

No que diz respeito ao formato da força contra electromotriz gerada, depende sobretudo da forma como os enrolamentos do estator se encontram ligados. Existem dois tipos de força contra electromotriz: Trapezoidal e Sinusoidal. Na Figura 3.6 representa-se cada uma destas variantes.

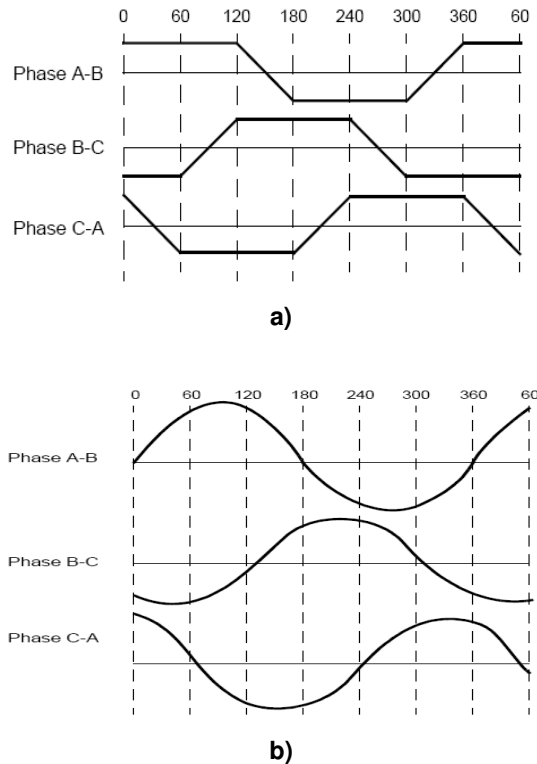


Figura 3.6 – Representação do tipo de força contra electromotriz gerada por um motor Brushless: a) Trapezoidal; b) Sinusoidal. (Fonte: Yedamale, P., 2003)

Como se pode verificar, as forças electromotrizes geradas apresentam um desfasamento temporal entre si. Nesse sentido, e de acordo com a figura anterior, a passagem por zero dá-se, em cada uma delas, em períodos distintos. Este será, então, o conceito chave para se efectuar a comutação. Cada um dos enrolamentos terá acoplado a si um circuito de detecção de passagem por zero. Desse modo, quando é detectada uma passagem por zero, o dispositivo de controlo efectua a comutação para o estado seguinte, de modo a consumir a rotação.

Na realidade, o detector de passagem por zero será, antes, um detector de passagem por metade do valor da tensão média aplicada ao motor. Estes circuitos podem ser implementados recorrendo a amplificadores operacionais. A configuração a usar deverá usar histerese, de modo a diminuir erros na detecção (Lepkowski, J., 2003).

3.1.1.3 Sensored ou Sensorless

Uma escolha entre este tipo de controlo está geralmente facilitada, quando em específico se ponderam duas variáveis: Custo – benefício. De facto, quando o custo reduzido é preponderante na concepção de um projecto, então a escolha deve recair sobre o controlo sem o uso de sensores, Sensorless. Tal condição, advém do facto de o uso de sensores, nomeadamente Tacómetros por efeito de Hall, representarem um custo significativo no preço final do controlador.

Por outro lado, o método Sensorless possui a desvantagem de que, a velocidades baixas e binários reduzidos, a força contra electromotriz gerada pode não ser suficiente para permitir um uso correcto do método. Devido a esse facto, o uso de sensores, sempre que o custo do produto final não é primordial, é preferível.

No que diz respeito aos sensores abordados existe uma grande homogeneidade nas valências proporcionadas. Embora o funcionamento de cada um deles seja completamente diferente, os resultados são em tudo semelhantes. Ambos possibilitam a medição de velocidade, posição e direcção. Devido a esse facto, a escolha sobre um ou outro acaba por ser mais de índole pessoal.

Porém, por diversas vezes, um motor do tipo Brushless tem incluído na sua concepção um dos sensores estudados. Essa mesma situação está presente no motor seleccionado para a execução deste trabalho, dado que possui tacómetros por efeito de Hall. O facto de existir no motor este tipo de sensores propõe o uso de um controlo sensed com o auxílio de Tacómetros por efeito de Hall.

3.1.2 Controlo de Velocidade

Para o controlo de velocidade, existem duas técnicas diferentes baseadas, no entanto, num método em tudo semelhante. Essas técnicas são o controlo de velocidade em malha aberta, ou, por outro lado, controlo em malha fechada. Estes tipos de controlo advêm da teoria de controlo clássica.

Como já foi referido anteriormente, embora noutro contexto, o motor DC Brushless é alimentado a DC. Nesse sentido, o controlo da velocidade pode ser efectuado pulsando o barramento DC. Assim, introduz-se desta forma o conceito de PWM no barramento. O PWM não é mais que um sinal periódico cuja razão entre a largura do impulso ON e o período do sinal é designada por duty-cycle.

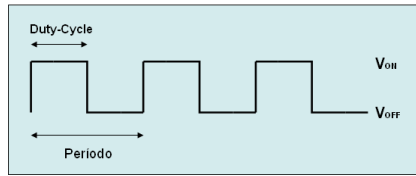


Figura 3.7 – Representação do Duty-Cycle de um sinal genérico.

Para um duty-cycle de 100%, o enrolamento encontrar-se-á alimentado pelo barramento durante todo o seu estado activo. Inversamente, caso o duty-cycle seja 0%, o enrolamento nunca será alimentado pelo barramento. Por fim, um caso intermédio em que o enrolamento se encontra ligado ao barramento em cerca de 50% de duty-cycle, é apresentado na Figura 3.7. De facto, ao se alterar a largura do impulso, está-se a alterar a tensão média aplicada ao enrolamento e, por sua vez, variar a corrente média, podendo controlar desta forma, a velocidade. Esta forma de poder variar a velocidade é usada pelos dois métodos de controlo de velocidade.

Usando o duty-cycle para se poder controlar a tensão média ao motor, é necessário, também, seleccionar a frequência de operação do mesmo. Nesse sentido, há que ter em consideração três pontos. O primeiro diz respeito à frequência de rotação do motor. O segundo, diz respeito à frequência audível. Por fim, o último ponto diz respeito a fenómenos de comutação (Brown, W., 2002).

A frequência do duty-cycle deverá ser, no mínimo, superior em dez vezes à frequência máxima de comutação da corrente nos diferentes enrolamentos de motor. Por outro lado, ao seleccionar esta grandeza, deve-se ter em atenção em seleccionar uma frequência fora da gama do audível. A comutação provocada pelo PWM cria perdas. Essas perdas são tanto maiores quanto a frequência de operação do mesmo. Nesse sentido a frequência máxima deve ser tomada em conta.

A velocidade máxima de rotação do motor é de 5250 rpm, ou 87.5 Hz – ver Anexo I para obter os valores característicos do motor. Para este caso, a frequência mínima deverá ser aproximadamente 5250 Hz.

De modo a tornar o funcionamento do PWM numa frequência fora do audível e que mantenha as condições anteriores, optou-se por usar uma frequência de PWM de 20 kHz.

3.1.2.1 Malha aberta

No que diz respeito a motores cuja alimentação é DC, e no caso do motor Brushless, em particular, são algumas as constantes geralmente fornecidas nos manuais de especificações dos mesmos. Neste caso concreto, uma constante

que interessa salientar é a *constante de velocidade*. Esta constante é normalmente expressa em V/rpm, o que no fundo indica uma ligação praticamente linear entre a força contra electromotriz que surge no motor e a velocidade que este atingirá nessas mesmas condições, para uma carga nula.

Será possível também relacionar a velocidade de rotação atingida pelo motor mediante a tensão a ele aplicada. Assim, presumindo que o motor opera em regime estacionário, e, portanto, não existe variação de corrente, resulta:

$$W_m = \frac{E_a}{K_{emf}} = \frac{V - I_o.R}{K_{emf}} \quad (3.1.2)$$

Em que,

W_m é a velocidade desejada, em rad/s;

E_a é a força contra electromotriz gerada, em V;

K_{emf} é a constante de velocidade do motor, em V.s/rad;

V é a tensão aplicada ao motor, em V;

I_o a corrente no motor quando este opera em regime constante, e por fim

R é a resistência aos terminais dos dois enrolamentos do motor activos, em

Ω .

Todas as constantes anteriores, são apresentadas segundo as unidades SI.

Assim, mediante uma velocidade desejada, a tensão a aplicar ao motor será:

$$V = W_m \cdot K_{emf} + I_o.R \quad (3.1.3)$$

Relativamente ao motor escolhido, quer I_o , quer R são constantes bastante diminutas – $I_o=435\text{mA}$ e $R=0.43\Omega$ – e, portanto, o seu produto o será também. Por essa razão, pode-se dizer, grosso modo, que a velocidade dependerá linearmente da tensão média aplicada ao motor, para uma carga constante.

O controlo em malha aberta consiste, então, em estabelecer à partida, uma linearidade entre o duty-cycle empregue nos enrolamentos e a velocidade desejada. De facto o controlo em malha aberta é o tipo de controlo em que a saída não afecta o sinal de referência. Este processo pode ser verificado através de um controlador típico em malha aberta (Melo, A.F., 2008).

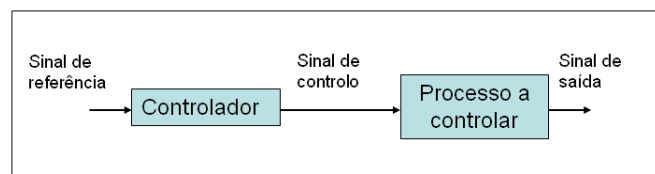


Figura 3.8 – Esquema geral do controlo em malha aberta de um sistema. (Melo, A. F., 2008)

Neste contexto, convém salientar que os métodos de controlo de velocidade são independentes dos métodos de rotação apresentados anteriormente. Nesse sentido, nada obsta que se use controlo de velocidade em malha aberta, e controlo da rotação do mesmo recorrendo ou não a sensores. No caso em que não se usam sensores, a taxa de comutação do motor é regida, principalmente, pela velocidade final desejada. Assim, e dependendo da carga acoplada ao motor, este poderá ter, ou não, capacidade para atingir essa mesma velocidade muito por fruto do binário que é capaz de gerar. Na situação em que o motor não tem capacidade para manter o ritmo de comutação exigido pela velocidade pretendida, então desperdiçará corrente ao tentar fazê-lo e a sua eficiência baixará drasticamente.

Recorrendo a sensores e, portanto, fazendo um controlo de rotação sensorado, nada garante que o motor se comporte como desejado. Neste campo, a carga acoplada, mais uma vez, tem um papel activo. O mesmo será dizer que, com cargas diferentes, e para um mesmo duty-cycle, o motor apresentará, à partida, velocidades diferentes. De seguida, será efectuada uma modelação do motor, de forma a ilustrar, através de simulação, o comportamento ideal do mesmo, mediante variações de inércia.

3.1.2.1.1 Modelação do motor

De modo a efectuar o controlo da velocidade do motor, é vantajoso o recurso a expressões matemáticas que definam o seu comportamento. Assim, é possível modelar o mesmo e prever o seu comportamento mediante diversas condições (Wiberg, J., 2003).

Um motor deste tipo pode ser, em termos eléctricos representado pela figura que se segue.

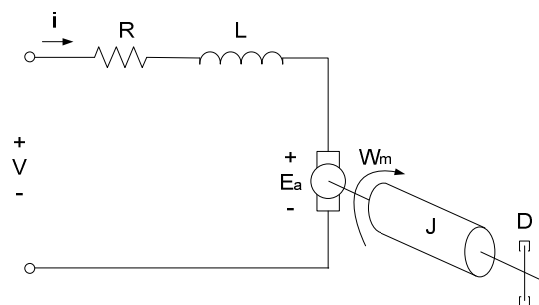


Figura 3.9 – Representação eléctrica de um motor Brushless. (Fonte: Wiberg, J., 2003)

Recorrendo a expressões eléctricas,

$$V = L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri + E_a \quad (3.1.4)$$

Por sua vez,

$$E_a = K_{emf} \cdot W_m \quad (3.1.5)$$

e

$$T = K_t \cdot i \quad (3.1.6)$$

No entanto, as constantes anteriores são iguais.

$$K = K_{emf} = K_t \quad (3.1.7)$$

O binário do motor está relacionado com a sua inércia e coeficiente de atrito mecânico por:

$$J \cdot \dot{W}_m + D \cdot W_m = K \cdot i \quad (3.1.8)$$

Usando transformadas de Laplace, e adequando as equações 3.1.4 e 3.1.8, vem que:

$$\begin{cases} (J \cdot s + D) \cdot W_m(s) = K \cdot I(s) \\ (L \cdot s + R) \cdot I(s) = V - K \cdot W_m(s) \end{cases} \quad (3.1.9)$$

Eliminando a corrente $I(s)$, é possível encontrar a função de transferência do motor, que relaciona a tensão presente aos seus terminais – entrada – com a velocidade atingida – saída.

$$\frac{W_m}{V} = \frac{K}{(J \cdot s + D) \cdot (L \cdot s + R) + K^2} \quad (3.1.10)$$

O que se pretende no entanto é perceber a resposta do motor em termos de velocidade em regime estacionário, mediante uma determinada velocidade de referência. Como foi dito anteriormente, a velocidade de referência é relacionada com a tensão aplicada ao motor, aproximadamente por:

$$V \cong W_{ref} \cdot K_{emf} \quad (3.1.11)$$

Assim, atendendo à equação 3.1.7, a função de transferência virá:

$$\frac{W_m}{W_{ref}} \cong \frac{K^2}{(J \cdot s + D) \cdot (L \cdot s + R) + K^2} \quad (3.1.12)$$

Para este tipo de motor, é frequente a omissão do coeficiente de atrito mecânico dado que, ou as outras constantes já entram em conta com esse valor, ou este não é significativo. Assim, a função de transferência do motor será:

$$\frac{W_m}{W_{ref}} \cong \frac{K^2}{J.s.(L.s + R) + K^2} \quad (3.1.13)$$

As constantes enunciadas na expressão anterior, são, geralmente fornecidas pelos fabricantes de motores. Assim, a tabela seguinte, Tabela 3-1, apresenta os valores característicos relativos ao motor em questão.

<i>Variável</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidade</i>
Inércia do rotor	J	20.9 x 10 ⁻⁶	Kgm ²
Constante de Velocidade	Kv	0.0433	V/rad/s
Constante de Binário	K	0.0433	Nm/A
Coeficiente de atrito mecânico	D	4.36x10 ⁻³	Nm.s
Indutância	L	56.5 x 10 ⁻⁶	H
Resistência	R	0.43	Ω

Tabela 3-1- Valores característicos do motor usado. (Fonte: Maxon Motor)

De seguida, na Figura 3.10 é apresentada a resposta ao degrau unitário do sistema projectado. Nesta figura encontram-se representados diversos casos. Em todos eles, apenas se altera a inércia acoplada ao mesmo.

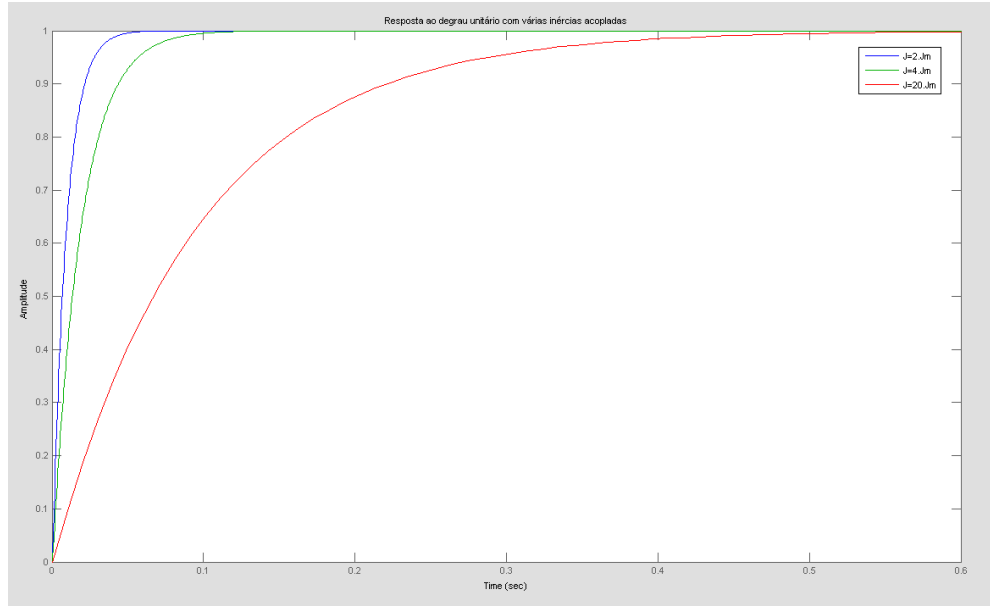


Figura 3.10 – Resposta teórica do motor ao degrau unitário com várias cargas acopladas.

Analisando o gráfico presente na Figura 3.10, verifica-se que o regime transitório piora à medida que se aumenta a inércia da carga. Porém, o valor obtido em regime estacionário é unitário. Tal facto acontece, dado que se optou por ignorar o efeito do coeficiente de atrito mecânico. Esta acção implementou um pólo na origem, tornando o sistema do tipo 1, e, como tal, anulou-se o erro em regime transitório.

Na prática, porém, não será possível atingir estes valores. Dado que o valor do coeficiente de atrito mecânico deverá ser bastante reduzido, então o erro em regime estacionário também o será. De facto, usando o teorema do valor final, obtém-se o valor em regime estacionário.

$$W_{mss} = \lim_{t \rightarrow \infty} W_m(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot W_m(s) \quad (3.1.14)$$

Para entrada ao degrau unitário, vem que o valor em regime estacionário atingido pelo sistema será:

$$W_{mss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{K^2}{J \cdot s \cdot (L \cdot s + R) + K^2} \cdot \frac{1}{s} = \frac{K^2}{K^2} = 1 \quad (3.1.15)$$

Como se pode ver pela equação 3.1.15, o erro em regime estacionário, para o caso em que não se considere o coeficiente de atrito mecânico, será nulo. Embora este tenha um valor reduzido, quando comparado com as constantes do sistema, o erro não será nulo na prática.

Por outro lado, a tensão aplicada ao motor não é constante. O circuito que proporciona o drive de corrente ao motor, quer pela queda de tensão apresentada

aos terminais do elemento de potência, V_{DS} , quer pela queda de tensão na resistência de sensing, não conseguirá providenciar uma tensão constante ao motor. Assim, para uma mesma velocidade de referência, dependendo da corrente pedida pelo mesmo, este apresentará uma velocidade instantânea diferente, muito por causa da queda de tensão na resistência de sensing.

Será nesse sentido que o controlo em malha fechada poderá melhorar o sistema, ou seja, proporcionar que mediante variações de carga, o motor consiga, dentro das suas possibilidades físicas, balancear a velocidade de referência com a velocidade instantânea. Este tipo de controlo será apresentado de seguida, sendo que posteriormente, será desenhado o compensador que detém essas mesmas qualidades.

3.1.2.2 Malha Fechada

Este tipo de controlo opera com o principal objectivo de equilibrar a velocidade pretendida da que é obtida, na realidade. Um esquema representativo do controlo em malha fechada está representado na Figura 3.11.

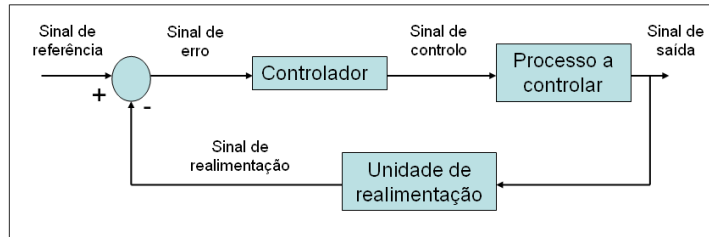


Figura 3.11- Esquema geral do controlo em malha fechada de um sistema (Fonte: Melo, A.F., 2008)

Como se pode verificar neste tipo de controlo, a velocidade instantânea do motor é comparada com a velocidade pretendida, gerando um sinal de erro. A partir deste sinal de erro, é possível determinar o melhor valor de duty-cycle a aplicar aos enrolamentos, de modo a obter uma velocidade instantânea mais estabilizada e próxima da velocidade pretendida (Melo, A. F., 2008).

Em termos práticos, um controlo deste género, pode ser implementado usando um controlador PID, ou um dos seus derivados. Este processo será ilustrado de seguida.

3.1.2.2.1 Compensador PID

Aquando da projecção de um compensador deste género, é necessário ter em consideração qual o fenómeno a controlar. Como se viu anteriormente, será necessário controlar, quer o erro em regime estacionário, quer o tempo de estabelecimento ou tempo de subida, no regime transitório.

Um compensador PID pode ser decomposto por três parcelas. Assim, este compensador poderá ser parcelado na componente Proporcional, Integral e Derivativa (Melo, A. F., 2008).

De seguida, na Figura 3.12, é apresentado o esquema geral de um compensador PID, em transformadas de Laplace.

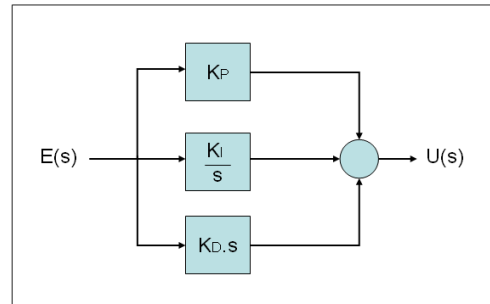


Figura 3.12 – Esquema global de um compensador PID. (Melo, A. F., 2008)

A Tabela 1 do Anexo II, mostra o efeito de cada uma destas componentes na resposta do sistema a compensar. Assim, usando a mnemónica presente nessa mesma tabela, verifica-se que não deverá ser necessário o uso a um controlador PID completo, mas sim, um controlador PI.

Usando este compensador, será possível anular o erro em regime estacionário – efeito da componente Integral – e dever-se-á conseguir melhorar quer o tempo de estabelecimento, quer o tempo de subida, actuando na componente Proporcional.

O compensador PI tem como função de transferência:

$$K_C = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P \cdot s + K_I}{s} \quad (3.1.16)$$

Ou, por outro lado, é comum também que este mesmo compensador se apresente segundo:

$$K_G = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \quad (3.1.17)$$

Com $T_i = \frac{K_P}{K_I}$.

No domínio dos tempos, este compensador será descrito pela equação 3.1.18.

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d(\tau) \quad (3.1.18)$$

Na prática, porém, pretende-se implementar este compensador de forma digital, e não de forma analógica, como vem descrito pela equação anterior (Ramos, C. J., 1997).

Nesse sentido, será necessário reajustar a equação. Assim, a variável temporal pode ser substituída por

$$t = n.T \quad (3.1.19)$$

Em que n é o número da amostra;

T é o período de amostragem.

Assim, após algumas transformações, e usando n como índice da amostra, vem que:

$$u(n) = K_P \cdot e(n) + K_I \cdot T \cdot \sum_{j=0}^n e(j) \quad (3.1.20)$$

Assim, a cada momento será calculado o erro. Este por sua vez será multiplicado pela constante K_P . Por outro lado, este mesmo erro é somado a todos os erros anteriores, dando origem ao erro integral que, será multiplicado pela constante integral, K_I e pelo período de amostragem. Como é possível verificar, o período de amostragem têm influência directa na resposta do compensador. Assim, a selecção do seu valor tem que ser efectuada com especial cuidado. Para que este método de compensação seja válido, será necessário que o período de amostragem seja, de facto, bastante inferior às constantes de tempo do sistema.

3.1.2.3 Adequação

Relativamente ao controlo em malha aberta, é reconhecido que para diferentes cargas, o motor agirá de forma diferente e, portanto, proporcionará uma velocidade diferente. Visto que a comutação entre diferentes estados vai ser efectuada por alteração de estado dos sensores de Hall, como se observou anteriormente, não haverá o risco de se perder o sincronismo entre o rotor e o estator.

O controlo de velocidade em malha fechada, embora não seja infalível, proporciona um maior ajustamento entre o ideal e o real. Contudo, convém salientar que um controlo rigoroso da velocidade não é um aspecto crítico deste trabalho.

Pelos motivos enunciados anteriormente, e no que diz respeito ao controlo de velocidade, ambos os métodos são passíveis de implementação no controlador a projectar. Dado que a implementação de um ou outro poderão ser interessantes, efectuar-se-á o projecto destes dois controlos, com vista, também, à averiguação do desempenho de cada um deles.

3.2 Implementação do controlo

Ao longo do desenho do controlador, são vários os aspectos que necessitam de uma cuidada atenção. Um correcto ajustamento entre o hardware e software tem que ser proporcionado à partida, para que a finalidade seja cumprida. É assim impossível dissociar um do outro. No entanto, para uma mais fácil percepção do controlo efectuado estes conteúdos serão abordados separadamente.

De seguida, na Figura 3.13 é apresentado, esquematicamente, a estrutura do controlo a usar.

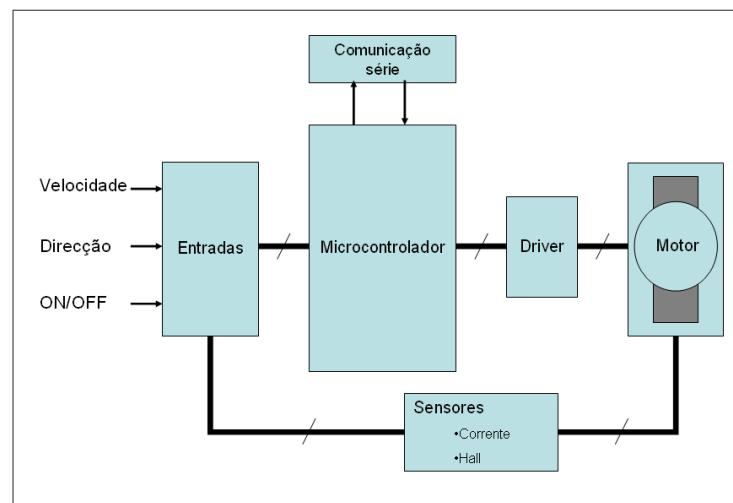


Figura 3.13 – Esquema do controlo usado.

Observando a figura anterior em pormenor, verifica-se que o elemento central do controlador, será, de facto, um microcontrolador. Este elemento é responsável por gerir toda a actividade do controlador. Assim, o microcontrolador deverá gerir todas as entradas, processá-las, podendo de seguida actuar sobre o motor. Por

outro lado, terá que proporcionar comunicação através de comunicação série. Todas estas acções deverão ser efectuadas em tempo útil.

A escolha do microcontrolador a usar será, portanto, fulcral.

3.2.1 Microcontrolador

As valências essenciais à correcta implementação do controlador obrigam à escolha de um microcontrolador muito específico. Em primeiro lugar, este deverá ser capaz de gerar sinais de PWM, de modo a poder controlar o estado dos os diferentes enrolamentos. São necessários dois sinais de PWM para cada enrolamento, para se poder gerir a direcção da corrente nos mesmos, por motivos que serão explicados mais à frente. Neste caso, e dado que o motor possui três enrolamentos, então o microcontrolador deverá possuir um mínimo de seis módulos PWM.

Embora não seja essencial, a existência de portas de captura que possam acondicionar os sinais provenientes dos sensores de Hall é desejável.

No caso presente, o microcontrolador deverá possuir um mínimo de duas portas analógicas e, de forma a efectuar comunicações, deverá ser providenciada comunicação série.

Por fim, é essencial que todas as valências sejam proporcionadas em portas lógicas disjuntas.

Neste sentido, foram encontrados dois microcontroladores que cumpriam os requisitos. São ambos da Microchip: PIC18F2431 e dsPIC30F2010.

Dado que estes têm uma performance bastante homogénea, a escolha recaiu sobre o microcontrolador PIC18F2431. O esquemático usado, referente ao microcontrolador pode ser consultado na Figura 3.14.

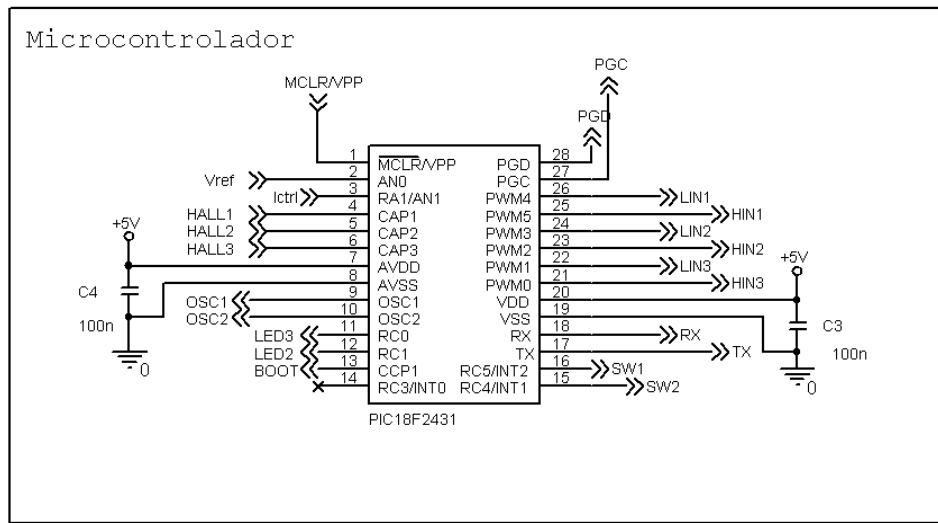


Figura 3.14 – Microcontrolador com as diversas ligações usadas.

3.2.2 Driver

O driver de corrente é, a par do microcontrolador, um dos elementos essenciais do controlador. Este é responsável por assimilar os sinais de controlo provenientes do microcontrolador, e de forma adequada, controlar a corrente em cada um dos enrolamentos. De modo a permitir que a corrente nos enrolamentos possa fluir nos dois sentidos, é necessário usar elementos de potência apropriados.

Existem, tipicamente, três componentes electrónicos capazes de proporcionar a transferência de corrente. São eles o transistor bipolar, MOSFET, ou ainda, os IGBT's. De facto como o controlo é efectuado por um microcontrolador, será sempre preferível usar componentes controlados por tensão em vez dos controlados por corrente. Assim, a tecnologia bipolar deve ser evitada. Nesta situação optou-se por se usar tecnologia MOSFET, simplesmente por haver uma maior familiaridade com estes dispositivos.

Relativamente à tecnologia MOSFET, existem ainda duas opções. Estas tecnologias são PMOS e NMOS. A diferença de comportamentos é, no entanto bastante diferente. Uma das principais desvantagens da tecnologia PMOS é o seu comportamento quando se encontra activo. Nestes dispositivos os portadores de carga são as lacunas. Estas possuem uma mobilidade lenta quando comparados com os electrões. Por outro lado, a resistividade está directamente ligada com a mobilidade dos portadores de carga. Assim, a resistividade entre o dreno e a fonte, $R_{DS(on)}$, de um PMOS será bastante superior à de um NMOS com as mesmas dimensões.

A tecnologia NMOS apresenta uma velocidade de resposta superior, sendo que se opta por usar a tecnologia NMOS, para ambos os componentes (Sedra, A.S., Smith, K.C., 2004).

Como já foi referido anteriormente, pretende-se que, quando um determinado enrolamento esteja activo, esteja ou ligado à tensão de alimentação do motor ou à massa. Por outro lado, quando estiver desactivada a corrente nesse mesmo enrolamento, este deverá poder apresentar uma tensão flutuante. Assim, na Figura 3.15 mostra-se a configuração a usar em cada enrolamento.

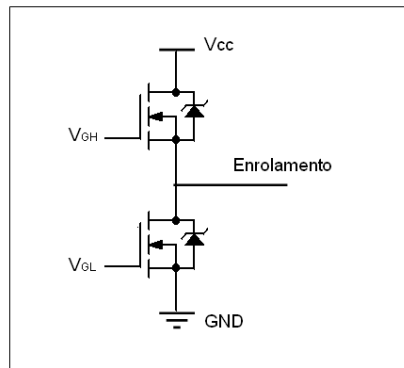


Figura 3.15 – Configuração usada para efectuar drive de corrente para o motor.

Como se pode observar, para que o enrolamento esteja ligado à tensão de alimentação, V_{CC} , basta que se active o MOSFET superior. Contrariamente, se se pretender que este esteja ligado à massa, dever-se-á activar o MOSFET inferior. Em ambos os casos se está, propositadamente a ignorar a tensão que existirá sempre entre o dreno e a fonte do MOSFET, V_{DS} . No caso em que esse mesmo enrolamento não deve conduzir corrente, então basta que quer o MOSFET superior quer o inferior não conduzam.

De acordo com o esquema mostrado será também de referir que ambos os MOSFET não poderão estar ON simultaneamente. Tal facto danificaria esses mesmos componentes.

Devido à natureza de construção do MOSFET do tipo N, é necessário aplicar uma tensão V_{GS} superior ao V_T do transístor, por forma a que este conduza. Assim, essa mesma tensão será dependente do MOSFET de potência escolhido.

Porém, será sempre necessário aplicar uma tensão superior à tensão de alimentação sempre que se deseje activar o mesmo. Assim, as saídas digitais do microcontrolador não serão adequadas para controlar cada um dos MOSFET. Nesse sentido, é necessário o uso de um componente auxiliar que, por um lado, proporcione tensões à sua saída que permitam a activação do MOSFET inferior e

que, por outro lado, seja capaz de gerar tensões superiores à tensão de alimentação, de modo a activar, quando necessário, o MOSFET superior.

O elemento encontrado responsável por esse mesmo comportamento tem por nome L6385. O seu funcionamento será descrito de seguida.

- Driver L6385

Este componente foi desenhado especificamente para dar solução a problemas deste género. Como se pode verificar, possui duas entradas de sinal. Estas correspondem ao sinal de controlo do MOSFET inferior e superior, LIN e HIN, respectivamente. Os níveis lógicos das entradas são compatíveis com os níveis lógicos do microcontrolador.

No que diz respeito às saídas, estão em fase com as entradas respectivas. No que diz respeito à saída inferior, LVG, apenas se adequam os níveis de tensão. A saída superior, HVG tem a principal característica de possuir uma alimentação flutuante, que depende de VOUT e VBOOT. Assim, a saída superior estará em fase com a entrada, sendo que os níveis de saída serão sempre VOUT ('0'), e VBOOT ('1').

O aspecto final do driver implementado está representado na Figura 3.16. Será também de salientar que existirá um driver destes para cada enrolamento.

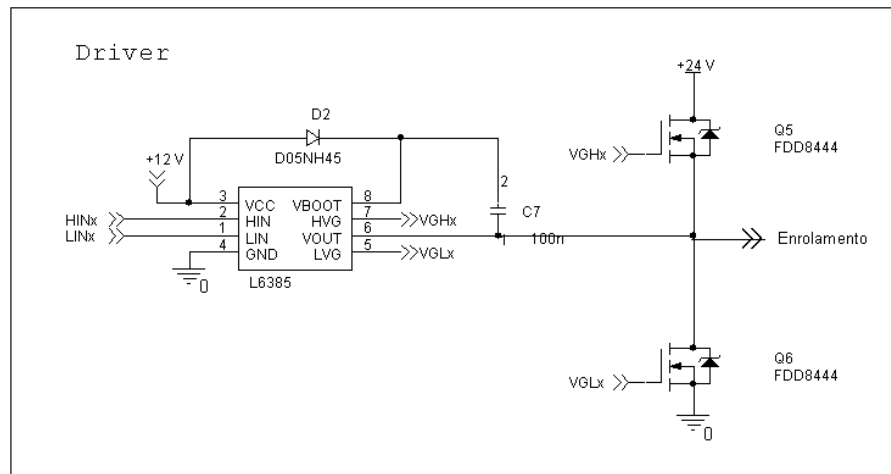


Figura 3.16 – Driver de corrente para o motor (circuito completo).

Neste mesmo contexto, pode-se verificar que a principal tarefa do driver L6385 será de proporcionar uma tensão superior à tensão de alimentação de modo a permitir que a corrente entre flua para um determinado enrolamento. Nesse campo, o condensador de bootstrap, C7, terá um papel preponderante.

Quando o MOSFET inferior se encontra activo, a tensão que aparecerá no ponto médio dos MOSFET tende para zero. Nessa situação, C7 carrega quer através do díodo quer pelo circuito interno de bootstrap. Assim, quando o MOSFET inferior é desactivado, e, posteriormente, se activa o MOSFET superior, a tensão no ponto médio dos MOSFET tende a estabilizar num valor próximo da tensão de alimentação. Nessa altura, a carga entretanto armazenada no condensador proporciona a VBOOT, de facto, uma tensão superior à tensão de alimentação. VBOOT serve como alimentação para o driver superior interno do componente.

Após resolvido o problema de proporcionar uma tensão superior à de alimentação, surge um novo paradigma. Quando o motor opera a baixas rotações, os consumos estáticos do driver L6385, levam a que a tensão armazenada no condensador diminua, sendo que, a partir de um determinado limiar, pode não ser suficiente para, de facto, activar o enrolamento do motor. Nesse sentido, há a necessidade de implementar um circuito capaz de fornecer carga ao condensador de bootstrap. Então, usou-se um circuito oscilador que efectua esse mesmo papel.

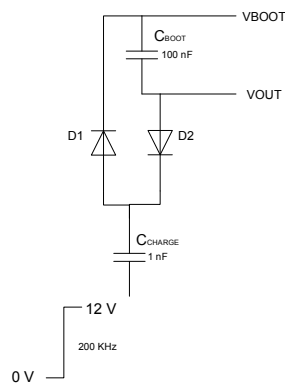


Figura 3.17 – Charge Pump externo usado.

Na Figura 3.17 apresenta-se o circuito oscilador usado. Este opera a uma frequência de 200 KHz, bastante superior à frequência máxima de trabalho do motor. Tal situação permite que o condensador de carga, C_{CHARGE} seja bastante reduzido.

Nesta situação, foi omitido o circuito restante por forma a simplificar a percepção do funcionamento deste. A este circuito dá-se o nome de charge pump. Como já foi referido, será útil apenas a baixas rotações.

A variação de VOUT pode ser desprezada, em comparação com as variações do oscilador. Assim, considera-se apenas o caso em que VOUT é constante e aproximadamente igual à tensão de alimentação. Nessa situação, quando o oscilador apresenta uma tensão de 0 V, então o condensador de carga,

C_{CHARGE} , carrega através de D2. A menos da queda de tensão no díodo D2, o condensador apresentará a tensão VOUT. Por outro lado, quando a tensão no oscilador é elevada para 12 V, faz com que a carga acumulada entretanto no condensador de carga seja descarregada através de D1 para CBOOT. Usando este princípio é, assim, possível manter a tensão VBOOT.

3.2.3 Medição de corrente do motor

Para efeitos de medição de corrente, foi usado uma resistência, sendo que o valor da tensão apresentada aos seus terminais é amplificado. Dado que, sobretudo devido aos fenómenos da comutação, a corrente no motor não será constante, usou-se um filtro passa baixo. Este será responsável por obter por hardware o valor da corrente média aplicada ao motor. Este filtro foi implementado com um circuito RC de modo que a constante de tempo fosse bastante inferior às constantes do sistema.

A saída deste circuito será lida numa das portas analógicas do microcontrolador, situação evidenciada na Figura 3.18. De facto, os MOSFET inferiores representados na Figura 3.16, não se encontram ligados à massa do circuito, dado que entre esse ponto e a massa foi colocada a resistência de sensing de corrente. A Figura 3.16 foi assim representada de modo a proporcionar uma melhor percepção.

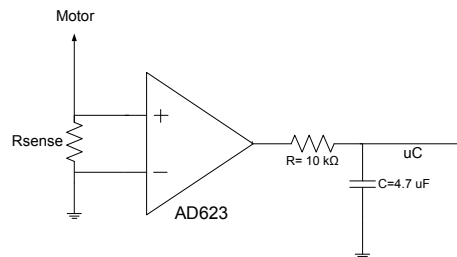


Figura 3.18 – Circuito de medição de corrente do motor.

3.2.4 Alimentações

No caso das alimentações de todo o sistema, e, de acordo com o que foi enunciado anteriormente, terão que coexistir no controlador três tensões diferentes. Estas tensões são 5V, 12 V e, por fim, 24V. Esta última, será fornecida pela fonte primária, ou seja, pela pilha de combustível. As duas restantes são criadas quer por um conversor DC-DC, quer por um regulador de tensão, para gerar os 5V e 12V, respectivamente. Em ambos os casos, estas tensões são

geradas tendo como tensão de entrada os 24V. A Figura 3.19 ilustra, precisamente, a obtenção dessas mesmas tensões.

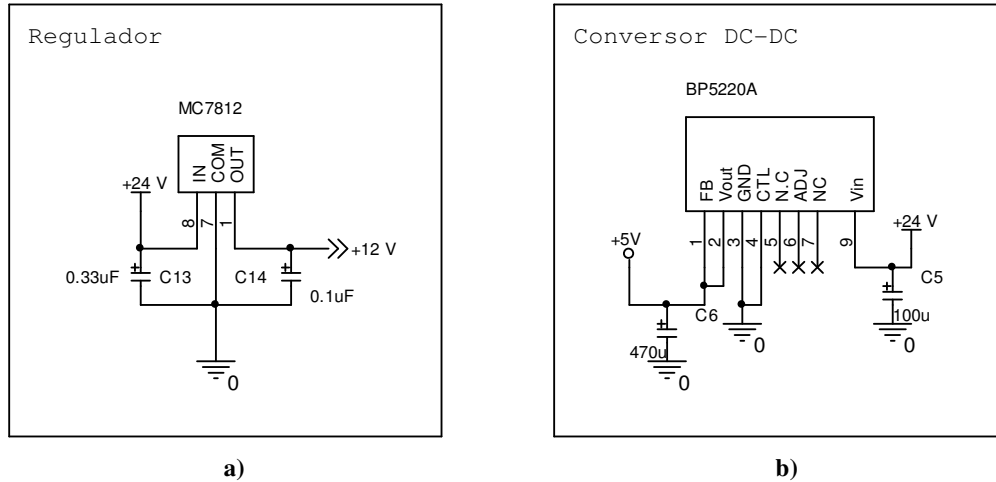


Figura 3.19 – Circuitos usados para obtenção das diversas tensões no circuito: a) Regulador de tensão MC7812 para obter 12 V; b) Conversor DC-DC para obter 5V.

3.2.5 Sinais de referência

O controlador desenhado possui, por outro lado, dois switches responsáveis quer pelo controlo da direcção de rotação, quer pelo controlo ON/OFF. E, para efeitos de controlo de velocidade, possui também um potenciómetro ligado a uma porta analógica.

3.2.6 Comunicação série

A comunicação efectuar-se-á em série, usando, para esse efeito as portas (TX e RX) disponibilizada pelo microcontrolador. No entanto, a comunicação é efectuada fisicamente através de USB.

De facto, incluiu-se no controlador um componente responsável por possibilitar essa implementação. De seguida é apresentada uma figura relativa a esse mesmo conversor.

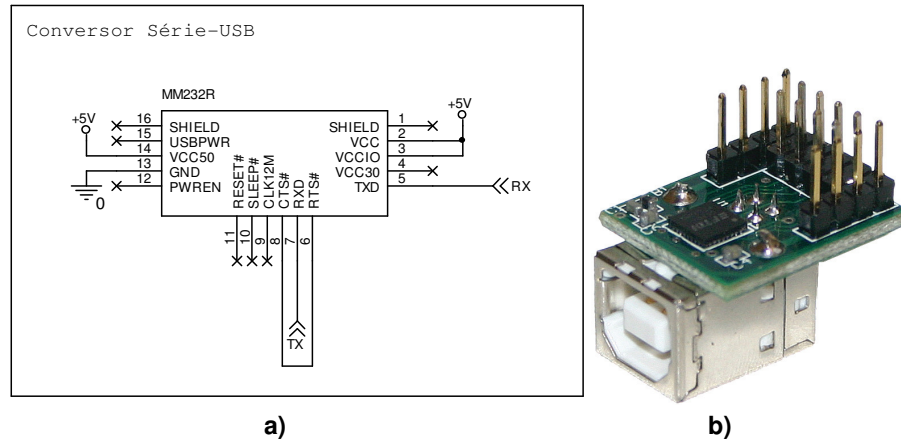


Figura 3.20 – Conversor de sinais série para USB e vice-versa: a) Esquemático usado; b) Ilustração do componente.

3.2.7 Programação

A programação do microcontrolador, é efectuada com o uso de um programador ICD2 da Microchip. Assim, existe no controlador uma ficha RJ-11, de modo a permitir a programação. Para se efectuar a ligação entre os dois dispositivos – controlador e programador – é necessário um cabo de ligação. Para o efeito, é usado um cabo directo, de modo a facilitar a sua montagem, caso necessário. O pinout desse cabo encontra-se representado na Figura 3.21.

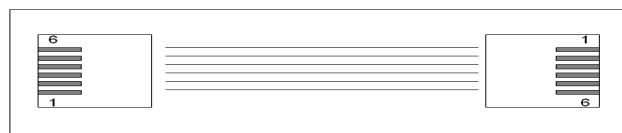


Figura 3.21 – Esquema de montagem do cabo de programação.

3.2.8 Esquemático e PCB

Relativamente ao controlador, foram apresentadas, em termos de Hardware as questões intrínsecas a cada módulo. Após se efectuarem todas as decisões, foi necessário acoplar todos os módulos de modo a gerar um controlador completo. Assim, no Anexo III é apresentado o esquemático global do controlador implementado.

Por outro lado, foi necessário criar a Placa de Circuito Impresso, PCB, de modo a se obter um modelo que implemente, fisicamente, o controlador entretanto criado. O PCB obtido encontra-se também disponível em anexo, no Anexo IV. Relativamente ao PCB, houve necessidade de tomar em conta alguns pontos. No circuito implementado, existem, tipicamente, dois tipos de sinais – potência e sinal. Assim, houve a preocupação de se separar os mesmos fisicamente. Toda a parte de sinal encontra-se na parte esquerda do PCB, enquanto que a parte de potência se encontra na zona mais à direita.

Após a conclusão destes pontos, e a montagem devida dos mais diversos componentes no PCB criado, obteve-se um controlador cujo aspecto visual se encontra representado na Figura 3.22.

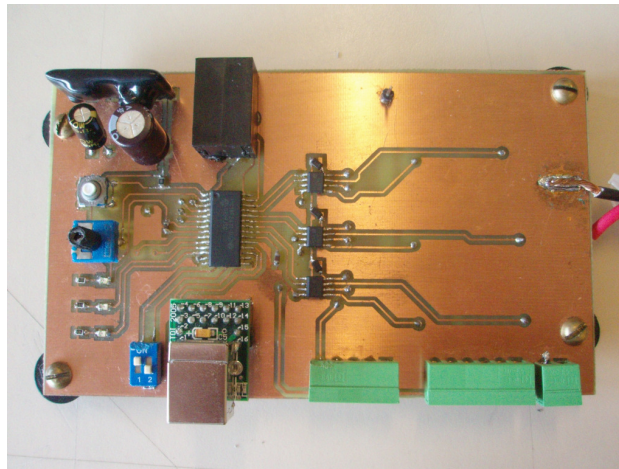


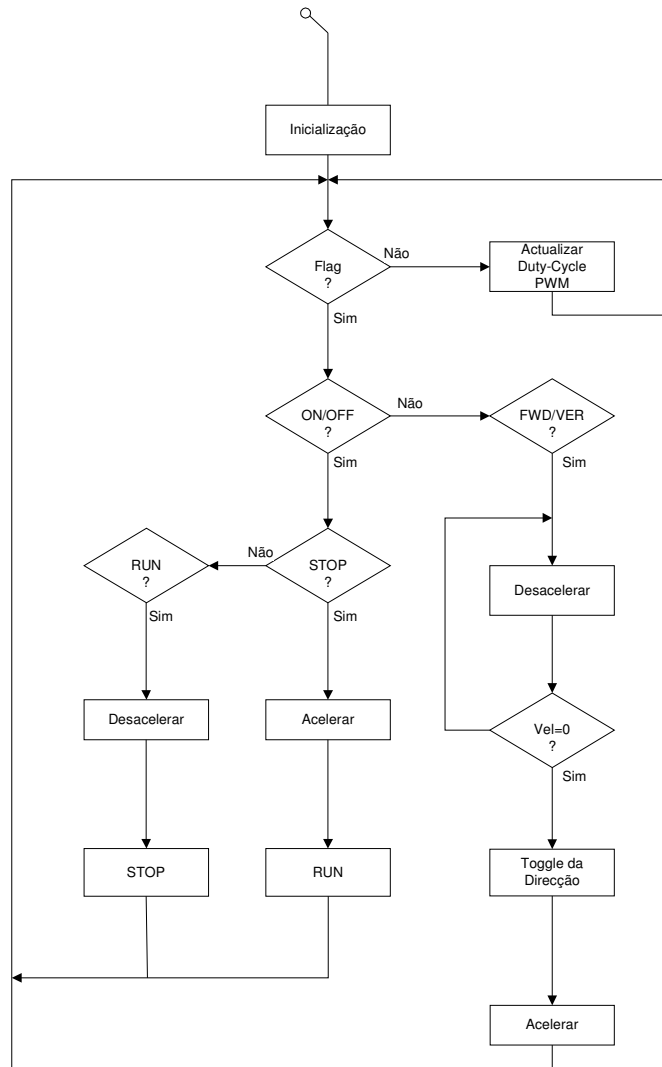
Figura 3.22- Imagem do controlador implementado.

Observando a figura anterior em pormenor, verifica-se que todas as ligações efectuadas com o motor e entradas para alimentação se encontram o mais próximo possível. O conector mais à esquerda, serve para assimilar os cabos provenientes ao motor respectivos às sondas de Hall. Por seu lado, o conector intermédio, servirá para efectuar as ligações dos diversos enrolamentos do motor. Por fim, o conector mais à direita, servirá para efectuar as ligações que providenciem a alimentação do controlador.

O anexo V contém a forma como estas ligações devem ser efectuadas.

3.2.9 Software

No que respeita ao software, será mostrado de seguida, na Figura 3.23, o diagrama de blocos do algoritmo usado.



a)

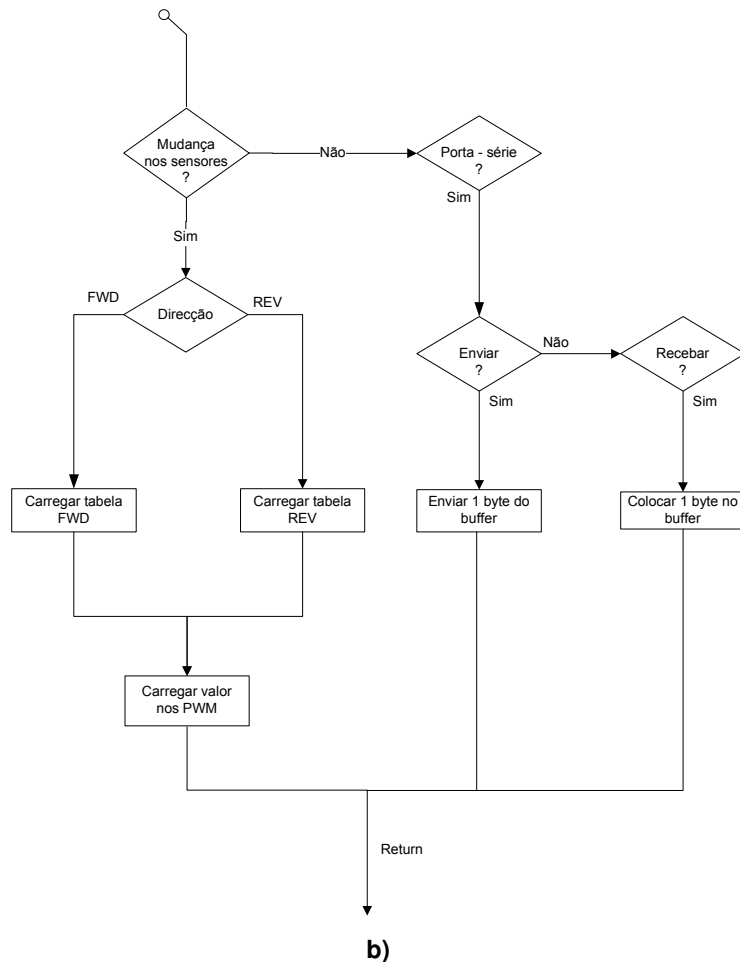


Figura 3.23- Diagrama de estados implementado: a) Rotina principal; b) Rotina de atendimento à interrupção.

Em termos de software, são inicializados todos os módulos inerentes ao microcontrolador. De seguida, existem dois níveis de abstracção. O primeiro, que pode ser visualizado na Figura 3.23a), diz respeito à rotina principal que estará a decorrer no programa principal, em ciclo infinito. O segundo, diz respeito à rotina de atendimento à interrupção. O diagrama de estados desta mesma rotina pode ser observado na Figura 3.23b).

No caso da rotina principal, esta verificará continuamente se existe alteração de alguma das flags. Usam-se flags para o estado ON/OFF do motor e uma flag de sentido de rotação. Caso nenhuma das flags estejam activas, então o valor do duty-cycle empregue aos enrolamentos é actualizado.

No caso de se ter activado a flag relativa ao estado ON/OFF do sistema, então dar-se-á o toggle do sistema. Caso esteja ON desacelera-se o motor e, de seguida, altera-se o seu estado para OFF. Pelo contrário, se este se encontrava em repouso, então, acelera-se até à velocidade desejada.

Se, por outro lado, se tiver activado a flag de sentido de rotação, então desacelera-se o motor até que a sua velocidade seja nula, sendo que, de seguida, se altera o sentido de rotação do motor e se acelera até à velocidade pretendida.

A par desta situação, diversas interrupções vão sendo geradas, quer à medida os sensores de Hall alteram o seu estado, quer pelo envio ou recepção de dados através da porta série. Em primeiro lugar, verifica-se se algum dos sensores de Hall alterou o seu estado. Neste caso, e mediante o sentido de rotação estipulado, faz-se o carregamento da respectiva tabela e de seguida altera-se o estado dos diferentes PWM, de modo a activar os enrolamentos pretendidos.

Nas tabelas Tabela 3-2 e Tabela 3-3, pode-se verificar quais os enrolamentos que devem estar activos, para cada valor devolvido pelos sensores de Hall, e mediante o sentido de rotação desejado.

- **Forward**

<i>Estado</i>	<i>Sensores</i>			<i>Enrolamento activo</i>	
	<i>H3</i>	<i>H2</i>	<i>H1</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>
I	1	0	1	V1	V2
II	0	0	1	V1	V3
III	0	1	1	V2	V3
IV	0	1	0	V2	V1
V	1	1	0	V3	V1
VI	1	0	0	V3	V2

Tabela 3-2 – Tabela que relaciona os sensores de Hall com os enrolamentos activos. Direcção: Forward. (Fonte: Maxon Motor)

- **Reverse**

<i>Estado</i>	<i>Sensores</i>			<i>Enrolamento activo</i>	
	<i>H3</i>	<i>H2</i>	<i>H1</i>	<i>High</i>	<i>Low</i>
I	1	0	1	V2	V1
II	0	0	1	V2	V3
III	0	1	1	V1	V3
IV	0	1	0	V1	V2
V	1	1	0	V3	V2
VI	1	0	0	V3	V1

Tabela 3-3 - Tabela que relaciona os sensores de Hall com os enrolamentos activos. Direcção: Reverse. (Fonte: Maxon Motor)

Este mesmo esquema diz respeito ao motor seleccionado, dado que diferentes motores podem ter diferentes construções. No caso de ter sido a comunicação série a gerar a interrupção, então verifica-se se se pretende enviar ou receber. Na recepção, coloca-se o byte recebido no buffer de recepção. No envio o conteúdo do byte apontado no buffer é enviado por comunicação série.

De seguida, é mostrada a forma de comunicação efectuada através da porta série.

3.2.10 Protocolo de comunicação

Os diversos tipos de controlo efectuados fazem com que o controlador desenhado seja por si só, autónomo. Dessa forma, deverá ser possível controlar o motor em diversas variáveis, nomeadamente, velocidade e sentido de rotação. No entanto, faz todo o sentido ser possível partilhar esses mesmos conteúdos.

Por outro lado, o motor deverá permitir o seu controlo de forma externa ao controlador. Tal facto permitirá um acoplamento deste sistema num outro mais vasto. Para se manter uma comunicação entre dois dispositivos, será necessário criar um protocolo, rígido o suficiente, por forma a garantir que os dados são transferidos de forma fidedigna, e que, por outro lado, existe sincronismo entre pedidos e respostas.

Para dar seguimento ao que foi referenciado anteriormente, foi criado um protocolo de comunicação.

3.2.10.1 Apresentação

O protocolo criado passa sempre por dois passos fundamentais: pedido e resposta. Foi estipulado que o controlador funciona como Slave, e, portanto, só responderá a pedidos efectuados por outro dispositivo, que neste caso corresponderá a um Master.

De seguida, apresenta-se uma figura ilustrativa do protocolo implementado.

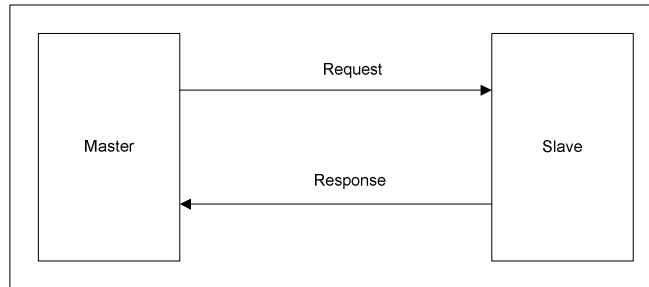


Figura 3.24 – Representação do protocolo de comunicação implementado.

Como se verifica pela Figura 3.24, o dispositivo Master efectua um pedido, que, como veremos mais a frente, poderá ser uma ordem – como por exemplo, arrancar o motor – ou pedido de dados – pedir a velocidade instantânea, por exemplo. De seguida, caso o controlador reconheça o pedido como um comando válido, ou acata a ordem, no caso disso, enviando sempre uma resposta de reconhecimento, ou, no caso de pedido de dados, enviando os dados respectivos.

No dispositivo master devem estar presentes os drivers que permitam emular uma porta série através de USB. O processo inicial de sincronização entre os dois dispositivos, passa por implementar as mesmas configurações em termos de comunicação série.

As configurações de origem do controlador são as seguintes:

<i>Definição</i>	<i>Valor</i>
Baudrate	115200
Bits de dados	8
Paridade	Nenhum
Stop bits	1
Controlo de fluxo	Nenhum

Tabela 3-4 – Configurações de origem da comunicação série no controlador.

Como veremos adiante, pode-se alterar o baudrate a que são efectuadas as comunicações, através de um comando específico.

3.2.10.2 Lista de comandos e respectivo significado

Foram criados vários comandos, responsáveis, quer pela obtenção de dados, quer, por outro lado, por comunicação de ordens, como já se havia dito.

Todos os comandos são enviados em ASCII, o que permite, por exemplo, um controlo do motor através de um programa terminal, tal como o HyperTerminal.

O aspecto geral de um comando enviado pelo Master pode ser encontrado na Figura 3.25.

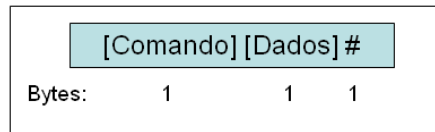


Figura 3.25 – Representação do comando enviado pelo dispositivo Master.

Um comando é sempre composto por 3 bytes. O comando em si consiste sempre num valor de 1 byte. No que diz respeito ao campo de dados, este é opcional, mediante o tipo de comando usado. Caso se trate de um pedido de dados, não são enviados dados. Em vez disso, é enviado o carácter %. No caso de ordens, o campo de dados é preenchido consoante as necessidades. Este processo será ilustrado mais a frente, aquando da apresentação de cada comando.

Por outro lado, e como já se frisou anteriormente, sempre que o Master envia um comando, dá-se a resposta do Slave. Assim, a resposta dada pelo Slave terá também que se reger por alguns princípios. A Figura 3.26 ilustra a resposta a um comando, por parte do Slave.

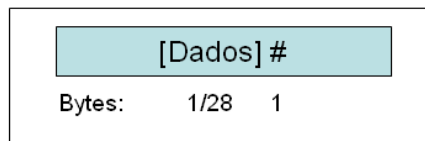


Figura 3.26 – Representação da resposta enviada pelo Controlador

Relativamente à resposta, esta poderá ser bastante diferente, mediante o comando entretanto recebido. O tamanho do campo de dados é variável podendo ser enviados entre 1 a 28 bytes. A resposta é sempre terminada com o carácter #.

3.2.10.2.1 Tabela de comandos

De seguida, são apresentados os comandos disponíveis para comunicação com o controlador. Para uma percepção mais detalhada de cada comando, aconselha-se a leitura do comando respectivo, presente no Anexo VI.

Comando	Dispositivo Master	Controlador
<i>Pedido de sincronização</i>	A % #	A#
<i>Pedido da velocidade de referência</i>	B % #	[D0] #
<i>Pedido do estado on/off e direcção</i>	C % #	[D1] [D0] #
<i>Pedido da velocidade instantânea</i>	D % #	[D0] #
<i>Pedido da corrente no motor</i>	E % #	[D0] #
<i>Pedido dos parâmetros do controlador</i>	F % #	[D4] [D3] [D2] [D1] [D0] #
<i>Activar controlo por porta-série</i>	G % #	G# / G%
<i>Desactivar controlo por porta-série</i>	H % #	H# / H%
<i>Controlo da velocidade de referência por porta-série</i>	I [D0] #	I# / I%
<i>Controlo do estado ON/OFF do motor por porta-série</i>	J [D0] #	J# / J%
<i>Controlo da direcção do motor por porta-série</i>	K [D0] #	K# / K%
<i>Alteração do Baudrate da comunicação série</i>	L [D0] #	L# / L%

Tabela 3-5 – Comandos disponíveis para efectuar comunicação com o controlador.

O procedimento do microcontrolador, relativamente à comunicação série, será explicado de seguida, usando para o efeito um diagrama de estados.

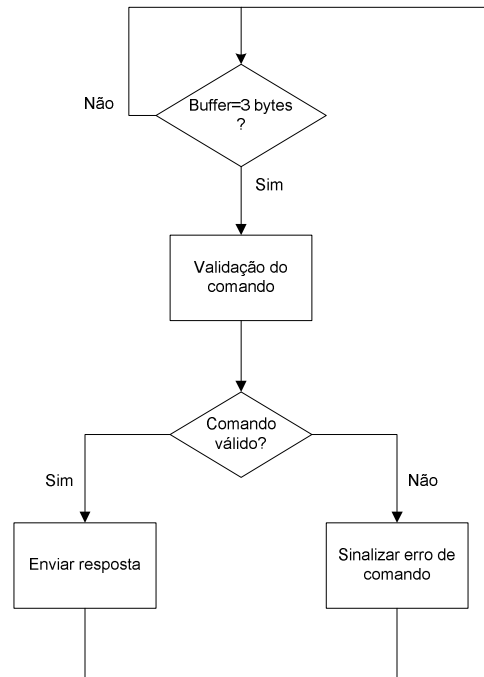


Figura 3.27 – Diagrama de blocos da acomodação dos comandos por parte da porta-série.

O controlador, dado que os comandos possuem tamanho fixo, verifica o buffer continuamente. Caso este possua 3 bytes, então dá-se a leitura do buffer. De seguida, processa-se o comando. Caso o comando seja válido é enviada a resposta, de acordo com as especificações do comando recebido. Caso contrário será enviada a resposta que corresponde a um erro.

3.2.11 Interface Gráfica

No sentido de proporcionar uma melhor leitura das variáveis do controlador, foi criado uma pequena interface gráfica, baseada no GUIDE do MATLAB. Esta aplicação comunica com o controlador através de comunicação série. Mais uma vez, para haver sincronização nos dados trocados entre os dois dispositivos, é necessário que a comunicação série de ambos seja igual. Como tal, as configurações por defeito da aplicação são iguais às configurações por defeito da porta série no controlador. Para se verificar essas mesmas configurações, basta recorrer à Tabela 3-4 já apresentada anteriormente.

De seguida, na Figura 3.28, encontra-se uma figura da interface criada, bem como uma pequena explicação das suas potencialidades.

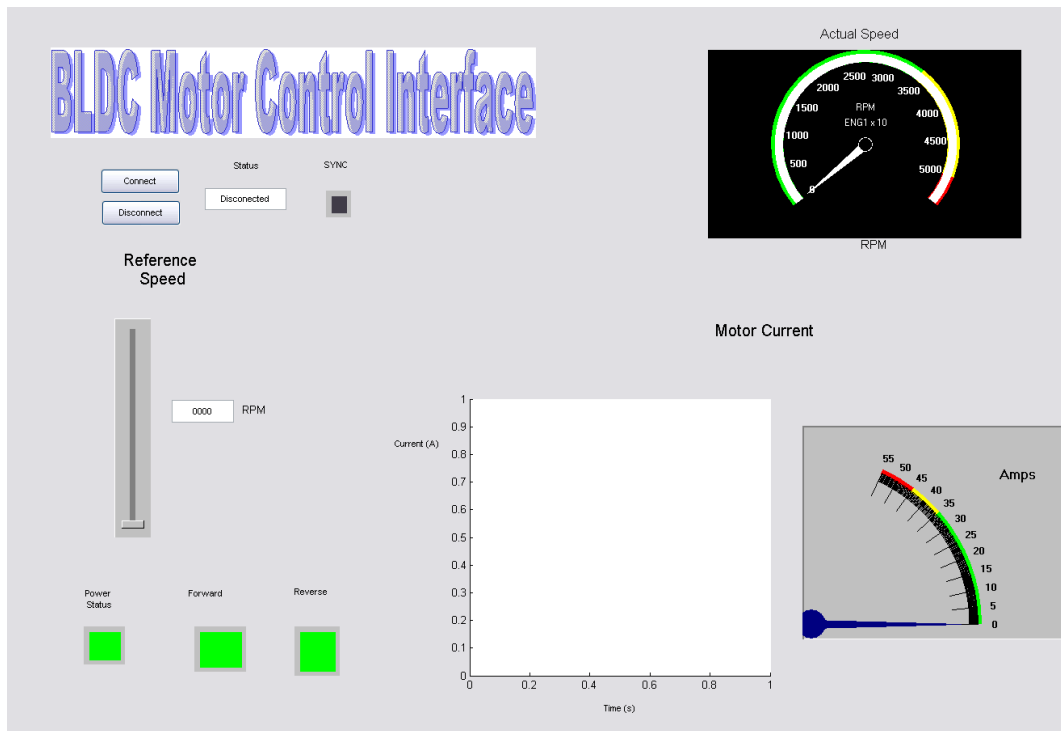


Figura 3.28 – Figura representativa do interface gráfico criado.

O modo de funcionamento da interface é bastante intuitivo. Inicialmente, deve-se assegurar que o cabo de transmissão de dados se encontra ligado fisicamente. De seguida, basta premir em “Connect”. O sistema assegurará a sincronização com o controlador. A partir do momento em que a sincronização ocorre, o LED de sincronismo acende, sendo que, de uma forma continuada, serão apresentadas as variáveis do sistema.

As variáveis apresentadas são a velocidade de referência, velocidade instantânea e corrente no motor. Existem também três LED’s que indicam o estado do motor, quer em termos de sentido de rotação, quer o seu estado ON/OFF. No que diz respeito à corrente do motor, esta é apresentada também sob a forma de um gráfico por forma a dar a noção da corrente presente no motor ao longo do tempo.

De modo a perceber melhor o funcionamento da interface em termos de algoritmo, é apresentado na Figura 3.29, um diagrama de blocos, representativo do mesmo.

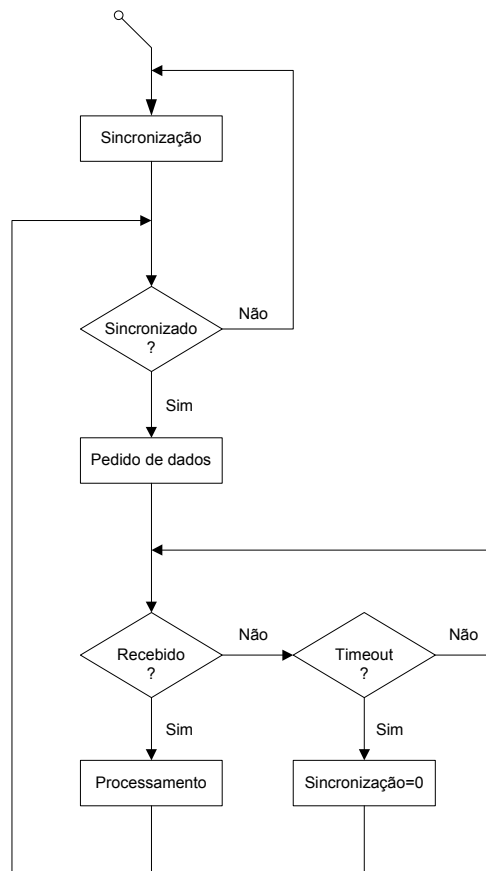


Figura 3.29 – Diagrama de estados usado pelo dispositivo Master de modo a recolher dados do controlador.

Inicialmente, dá-se a tentativa de sincronização entre os dois dispositivos. Depois de a sincronização se ter efectuado com êxito, e de forma contínua, são pedidos novos dados. Caso estes sejam recebidos de acordo com as expectativas, dá-se o processamento dos mesmos assim como a sua manutenção no interface. Se, por outro lado, os dados não forem recebidos dentro de um tempo predeterminado, ou caso sejam recebidos num formato diferente do esperado, então dá-se um timeout, ocorre a sinalização de perda de sincronismo, e todo o processo é reiniciado.

Será de notar que, todas as transferências de dados, parte a parte, obedecem ao protocolo de comunicação implementado, citado, em pormenor, na secção anterior.

4 Testes e resultados

Ao longo deste capítulo são apresentados os testes efectuados, no sentido de avaliar o desempenho global do sistema desenhado. Posteriormente, são analisados esses testes e apresentados os resultados mais significativos.

Convém salientar que aquando da realização dos vários testes, não houve acesso ao motor seleccionado, por avaria. Assim, todos os testes foram elaborados com um motor Brushless da MOOG, cuja ficha técnica pode ser consultada em anexo, no Anexo I, secção Motor de Testes.

O desenho do sistema completo teve como base para o fornecimento de energia eléctrica uma pilha de combustível. Do ponto de vista eléctrico, uma pilha de combustível terá um comportamento muito semelhante a uma bateria. Dado que aquando da realização do trabalho não havia uma pilha de combustível disponível, então o sistema foi implementado e testado com recurso a uma bateria.

4.1 *Testes*

Num contexto prático, o teste mais simples que pode ser efectuado ao conjunto controlador/motor, é, de facto, verificar se o motor roda convenientemente e se é possível variar a sua velocidade. Estes testes, porém, conduzem a grandezas booleanas, sendo que os resultados obtidos não apresentam grande relevância. Nesse sentido, foram efectuados diversos tipos de testes, de modo a mostrar a potencialidade do sistema desenvolvido.

4.1.1 Determinação das Constantes do compensador PI

De modo a melhorar a resposta do motor, usou-se, um compensador PI, como se referiu outrora. Nesse sentido, efectuaram-se testes de modo a obter as constantes K_P e K_I .

4.1.2 Controlo de velocidade em malha aberta

Neste ponto, efectuou-se o estudo comportamental do motor para diversas velocidades de referência.

Assim, para cada um destes testes, o motor parte do repouso, sendo que a velocidade de referência é imposta *a priori*, não sendo mais alterada. As velocidades de referência usadas estão espaçadas de 34 rpm, de modo a se usar, efectivamente, os diferentes valores de duty-cycle empregue nos enrolamentos do motor.

Os dados gerados são transferidos por porta-série e processados, posteriormente. Deste modo é possível analisar quer a resposta do regime transitório, quer do regime estacionário.

São registadas 100 valores de velocidade, obtidos com um período de 5 ms. Assim, obtém-se a resposta do motor durante cerca de 500 ms.

4.1.3 Controlo de velocidade em malha fechada

Inversamente ao ponto anterior, implementou-se um controlo de velocidade em malha fechada. Os testes elaborados nesta secção tem como principal objectivo verificar o desempenho do motor, de modo a se poder efectuar as devidas comparações com o controlo de velocidade em malha aberta. O procedimento foi, em tudo, semelhante ao do ponto anterior. No entanto, como um dos objectivos será verificar o erro em regime estacionário, optou-se por se alongar o número de amostras para 1600. Desta forma obtém-se a resposta do motor em 8 segundos.

4.1.4 Medição da corrente

Neste ponto foram elaborados alguns testes cujo intuito era efectuar uma ligação entre a corrente média aplicada ao motor e a velocidade de rotação do mesmo. Assim, retirou-se vários valores de corrente a velocidades diferentes, de modo a efectuar as devidas comparações.

Foram retirados valores de corrente para várias velocidades. As velocidades seleccionadas encontram-se espaçadas de 100 rpm. O intervalo de velocidades vai desde os 300 rpm, até os 3400 rpm.

4.2 Resultados

Os resultados obtidos para os testes mencionados anteriormente serão apresentados de seguida.

4.2.1 Determinação das Constantes do compensador PI

Na implementação do compensador PI, usou-se uma equação que deriva da equação representada pela equação 3.1.20. (Ramos, C. J., 1997).

A equação 4.2.1 representa, então, a equação usada.

$$u(n) = u(n-1) + K_P \cdot [e(n) - e(n-1)] + K_I \cdot T \cdot e(n) \quad (4.2.1)$$

Como já foi dito, a escolha do período de amostragem deve ser efectuada de modo que seja inferior às constantes de tempo do sistema. Assim, optou-se por usar um período de amostragem de

$$T = 5ms \quad (4.2.2)$$

Na sequência do que foi dito, será necessário definir as duas variáveis de controlo: K_P e K_I , ou T_i . Optou-se por usar regras empíricas no que diz respeito à obtenção destas constantes. Inicialmente, implementou-se apenas o compensador com a sua vertente Proporcional, K_P . Foi-se incrementando este valor até que a resposta ao degrau obtivesse alguma sobre-elevação. Posteriormente, e encontrado esse valor, adicionou-se a parcela Integral do mesmo compensador, e ajustou-se o seu valor, de modo a tornar a resposta ao degrau estável, anulando, por outro lado, o erro em regime estacionário.

Neste contexto, convém salientar que, os valores encontrados para ambas as constantes, foram obtidas, com uma a velocidade de referência empregue no

sistema bastante reduzida – 400 rpm. Efectivamente, a resposta do motor melhora à medida que se aumenta a velocidade de referência. Nesse sentido, caso se tivesse encontrado os valores das constantes K_P e K_I para uma velocidade de referência elevada, o motor teria uma degradação quer no regime transitório como estacionário a baixas rotações, correndo o risco de falhar o controlo.

Os valores das constantes foram ajustados por experimentação, sendo que os valores finais encontrados foram:

<i>Constante</i>	<i>Valor</i>
K_P	0.75
K_I	4.6875

Tabela 4-1: Valores encontrados para construção do compensador PI.

4.2.2 Controlo de velocidade em malha aberta

Nesta secção será apresentada a resposta do motor a várias velocidades de referência. De seguida, serão apresentados alguns gráficos que elucidam a resposta do motor para várias velocidades de referência.

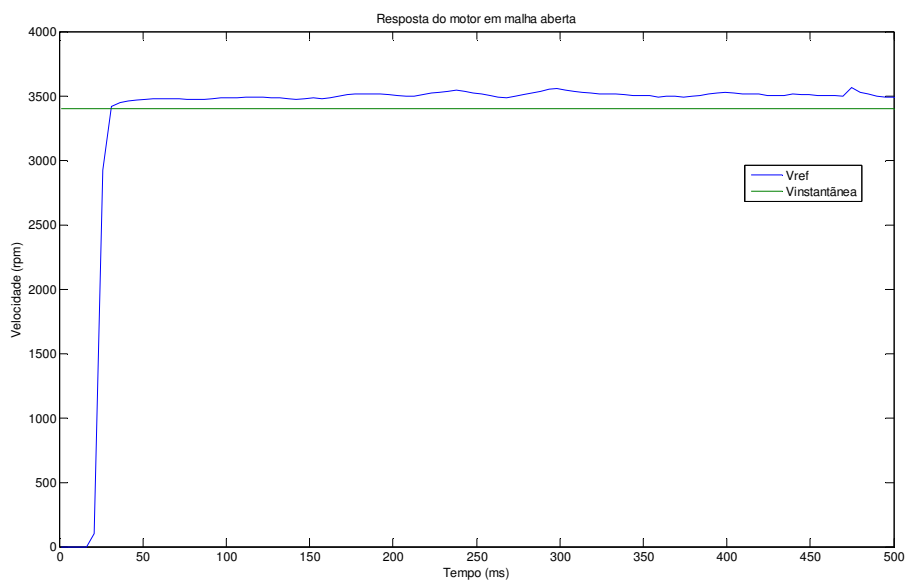


Figura 4.1 – Resposta do motor em malha aberta para uma velocidade de referência de 3400 rpm.

A Figura 4.1 mostra a resposta do motor em malha aberta para uma velocidade de referência de 3400 rpm. Como se pode verificar, o motor responde à velocidade de referência com uma variação inicial de velocidade muito elevada. De seguida, esta velocidade estabiliza num valor um pouco superior ao imposto pela velocidade de referência.

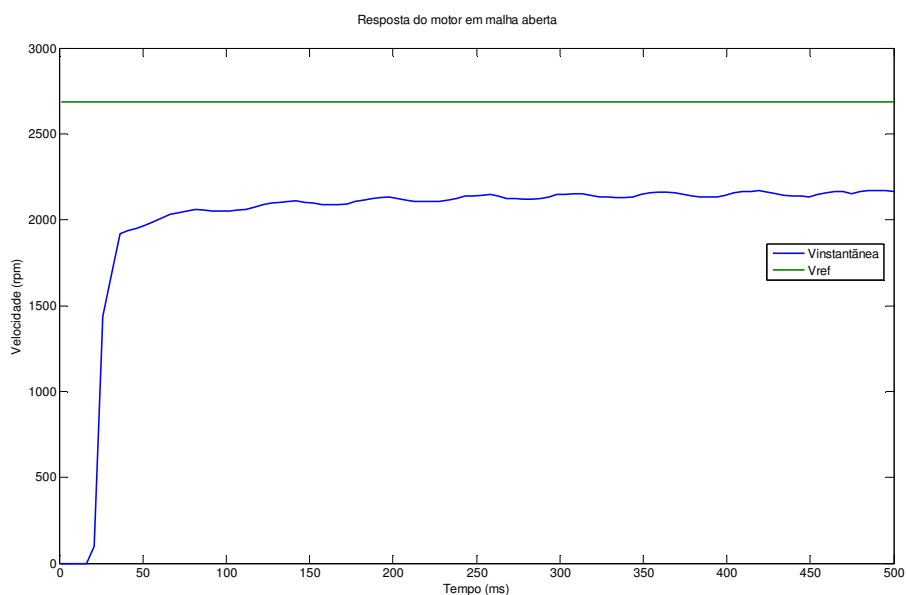


Figura 4.2 - Resposta do motor em malha aberta para uma velocidade de referência de 2686 rpm.

Como se pode observar pela Figura 4.2, quando se impõe uma velocidade de referência aplicada ao motor de 2686 rpm, este apresenta uma elevada variação inicial de velocidade, sendo que posteriormente se estabiliza. No entanto, o valor em que o mesmo estabiliza encontra-se, porém, bastante afastado da velocidade de referência.

A Figura 4.3 mostra a resposta do motor quando a velocidade de referência é de 1904 rpm. Como se pode verificar, a resposta transitória do motor é desta feita bastante mais lenta que as respostas a velocidades de referência superiores. Por outro lado, verifica-se também que o erro em regime estacionário é o mais elevado das situações observadas.

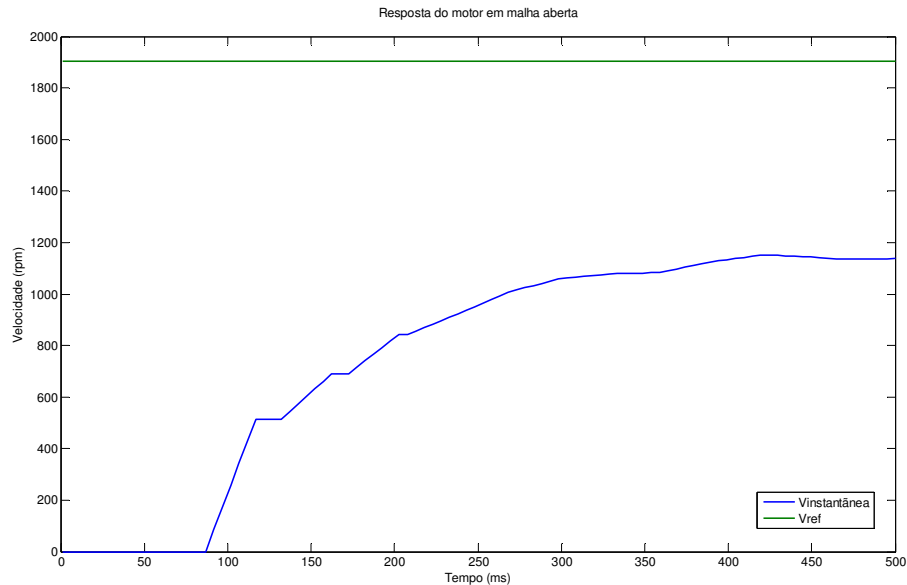


Figura 4.3 – Resposta do motor em malha aberta para uma velocidade de referência de 1904 rpm.

A Figura 4.4 mostra, assim, o erro em regime estacionário que se obteve para as diferentes velocidades de referência. Convém salientar que a expressão relativa ao erro em regime estacionário é dada por

$$e_{ss}(t) = V_{ref} - V_{ss} \quad (4.2.3)$$

Em que

$e_{ss}(t)$ é o erro em regime estacionário;

V_{ref} , a velocidade de referência;

V_{ss} a velocidade final atingida pelo motor.

Assim, verifica-se que à medida que se aumenta a velocidade de referência, diminui-se o erro em regime estacionário. Para velocidades de referência muito elevadas, a velocidade atingida pelo motor é superior ao valor dessa mesma referência. Tal facto torna o erro em regime estacionário negativo.

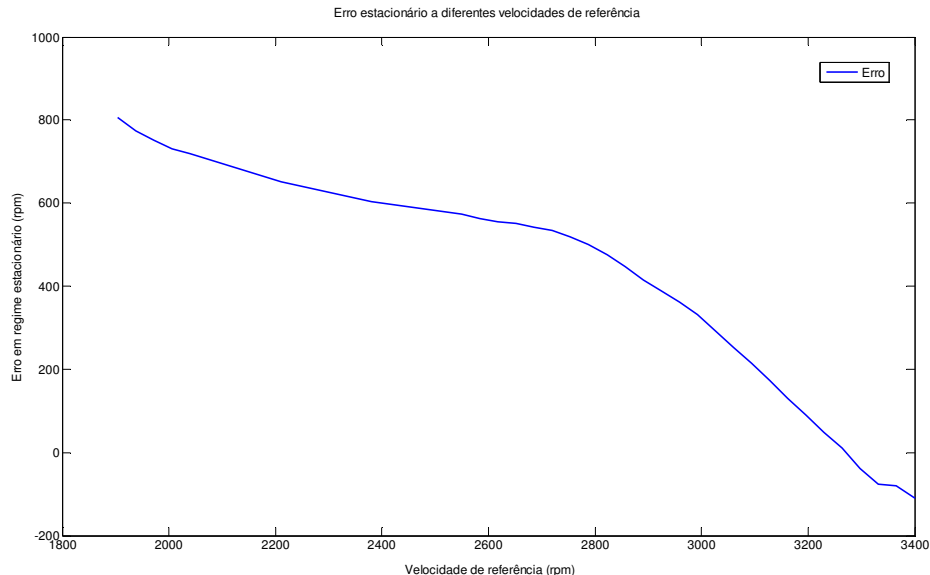


Figura 4.4 – Erro estacionário obtido em malha aberta a diferentes velocidades de referência.

4.2.3 Controle de velocidade em malha fechada

Após a implementação do compensador PI obteve-se a resposta do motor para várias velocidades de referência. Esses mesmos resultados são mostrados de seguida.

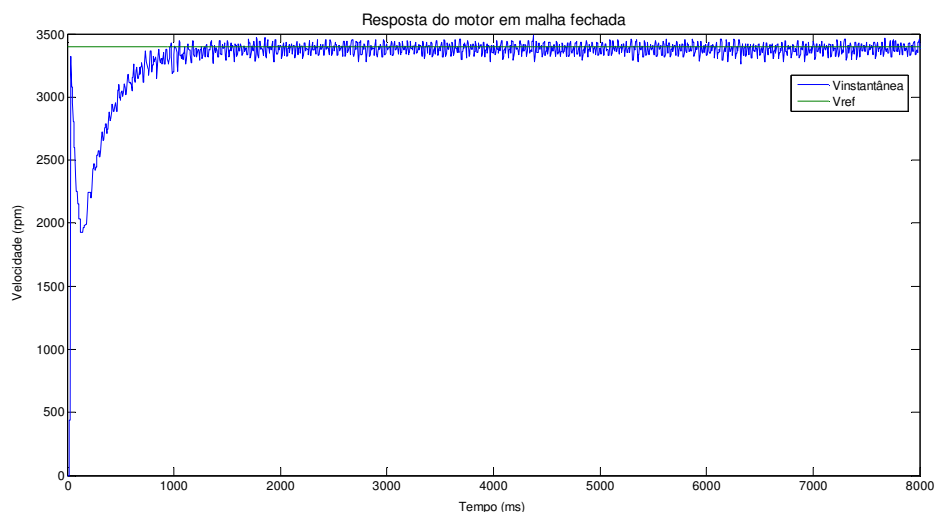


Figura 4.5 – Resposta do motor em malha fechada para uma velocidade referência de 3400 rpm.

Através da análise da Figura 4.5 é possível verificar o caso em que se usou uma velocidade de referência de 3400 rpm – curva verde. Por outro lado, é possível também verificar a resposta do motor a essa mesma ordem. Como é possível verificar, o motor parte do repouso, sendo que, posteriormente, se afirma em torno de uma velocidade próxima da referenciada. Por outro lado, na Figura 4.6 é possível verificar o comportamento do motor para uma velocidade de referência de 1300 rpm. Como se pode verificar, a resposta em regime transitório é mais rápida, quando em comparação com o caso anterior. Em termos estacionários, é possível verificar que o valor médio obtido se encontra muito próximo do referenciado. Por outro lado, a oscilação aquando do regime estacionário é bastante menor que a caso anteriormente abordado.

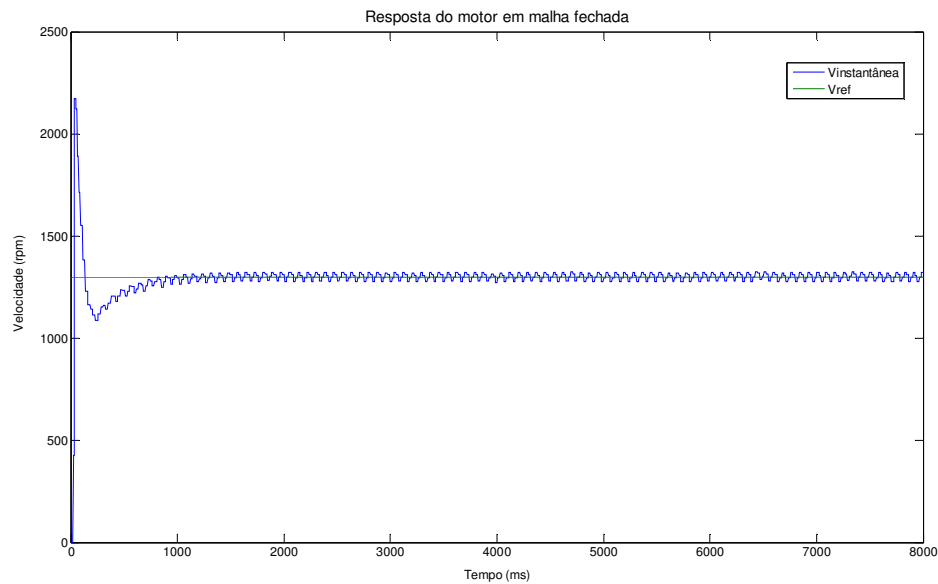


Figura 4.6 - Resposta do motor em malha fechada para uma velocidade referência de 1300 rpm.

A Figura 4.7 demonstra a situação em que se coloca uma velocidade de referência de 250 rpm. Como se pode verificar, o controlo efectuado actua de modo a manter o motor nessa mesma velocidade. No entanto, não o consegue. Este foi, de facto, o limite inferior que delimita o correcto funcionamento do motor em questão, para o compensador entretanto gerado.

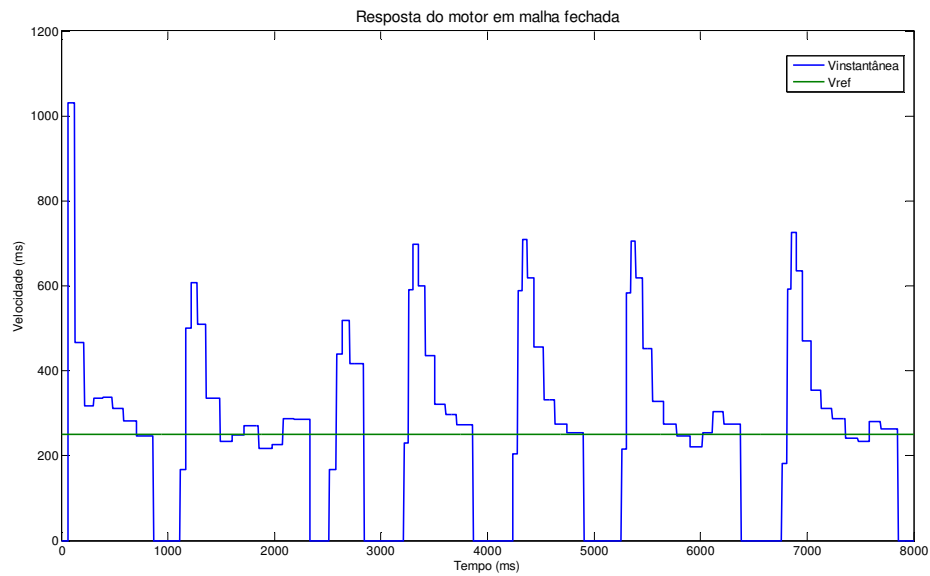


Figura 4.7 - Resposta do motor em malha fechada para uma velocidade referência de 250 rpm.

A figura seguinte, Figura 4.8, mostra o erro médio obtido para as diversas velocidades de referência. Como se pode verificar, para as várias velocidades o valor obtido em regime estacionário encontra-se próximo do referenciado. Os valores médios de velocidade obtidos desviam-se do referenciado no máximo de 18 rpm e, como limite inferior -13 rpm.

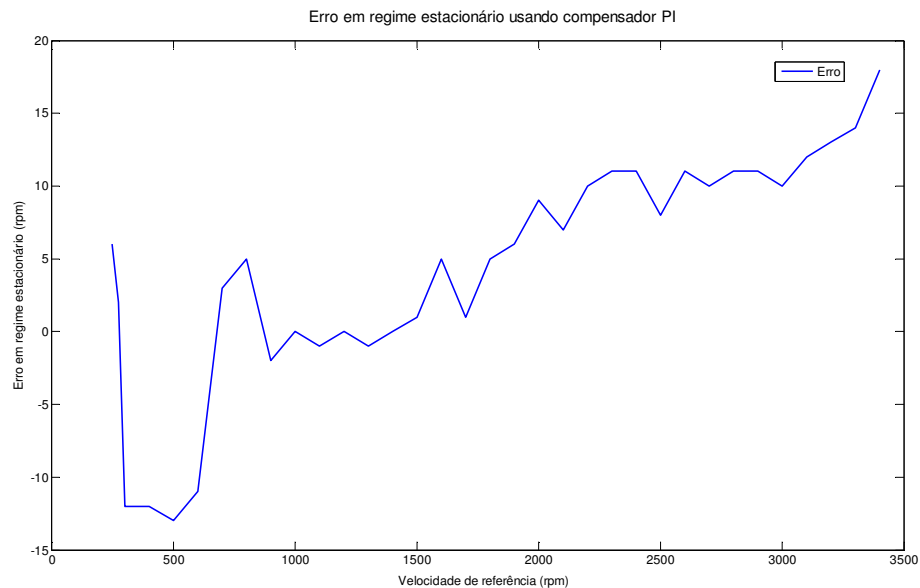


Figura 4.8 - Erro estacionário obtido em malha fechada para as diferentes velocidades de referência.

4.2.4 Medição da corrente

No gráfico seguinte, Figura 4.9, representa-se a curva de corrente média aplicada ao motor para velocidades distintas. Os valores de velocidade representados são 3400, 1900 e 300 rpm.

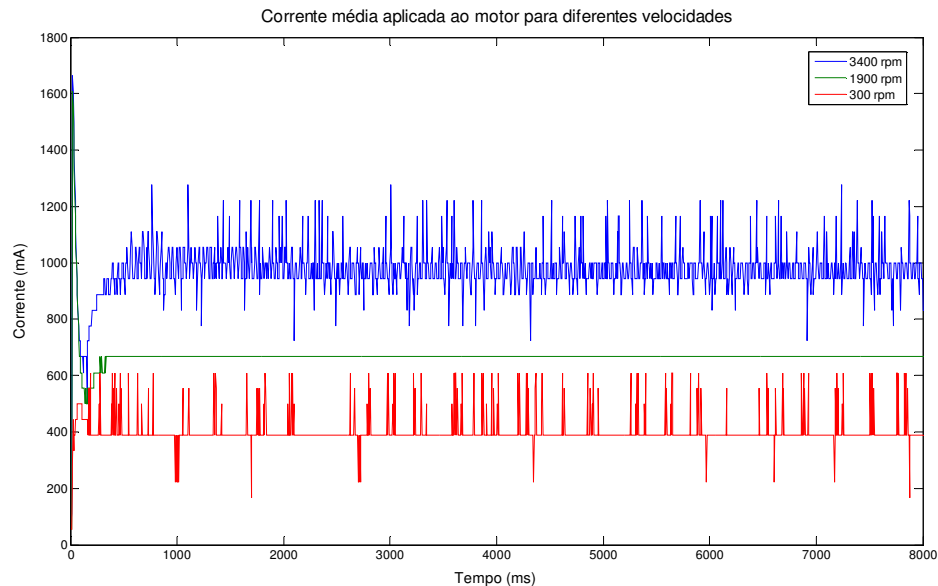


Figura 4.9 – Representação da corrente média aplicada ao motor para velocidades distintas.

Como se pode verificar pela figura anterior, para uma determinada velocidade obtêm-se valores de corrente que, embora apresentem alguma oscilação, possuem um valor médio. Usando esse mesmo valor, obteve-se um gráfico, presente na Figura 4.10, que relaciona a corrente média que é aplicada ao motor, em regime estacionário, para as diferentes velocidades.

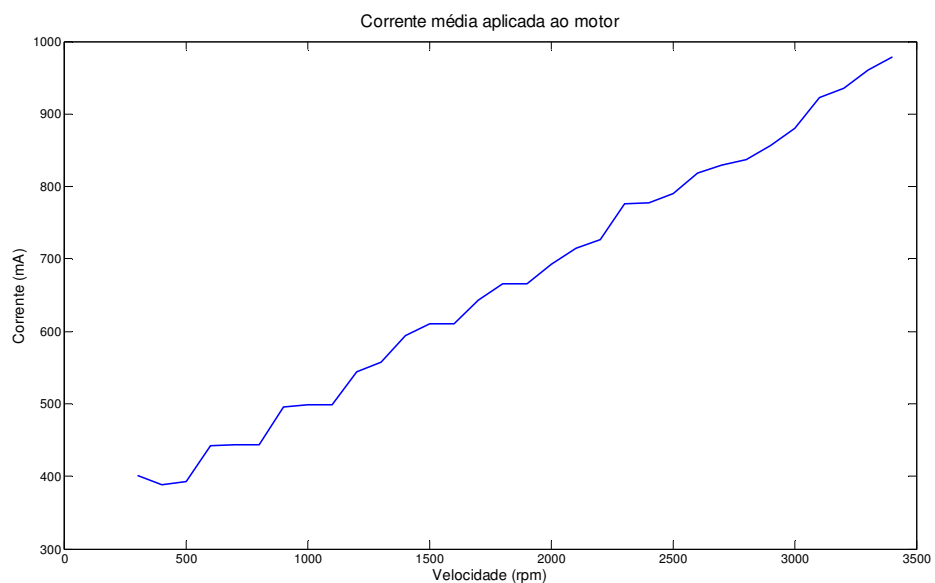


Figura 4.10 – Corrente média aplicada ao motor para diferentes velocidades.

De acordo com a figura anterior, pode-se verificar que a corrente média aplicada ao motor aumenta à medida que se incrementa a velocidade do mesmo. Verifica-se, de igual modo, que existe uma razão aproximadamente linear entre as duas variáveis enunciadas.

5 Conclusões e trabalho futuro

Ao longo deste capítulo serão efectuadas as conclusões relativas ao trabalho efectuado bem como algumas propostas para uma possível continuação do trabalho desenvolvido.

5.1 *Conclusões*

No que diz respeito aos objectivos propostos, foram cumpridos. As ordens que são atribuídas ao motor são executadas, quer sejam enviadas por dispositivos intrínsecos ao controlador, quer através da comunicação série.

Através do controlo em malha aberta da velocidade do motor, verifica-se que é impossível, por esta via, garantir que a velocidade pretendida é, de facto, a obtida na prática. Por outro lado, usando este tipo de controlo é impossível impor velocidades inferiores a cerca de 1000 rpm, que acontecem para uma velocidade de referência de 1904 rpm.

No que toca ao controlo de velocidade em malha fechada, pôde-se verificar que, com excepção nos extremos de velocidade, se obteve um erro em regime estacionário praticamente constante e de aproximadamente 30 rpm. De facto, com a aplicação deste tipo de compensador seria de esperar que o erro em regime estacionário fosse inferior, o que não foi possível atingir. Tal situação pode dever-se ao facto de existir apenas 100 valores distintos de duty-cycle a aplicar ao motor.

Relativamente à corrente média aplicada ao motor, verifica-se que aumenta à medida que se aumenta a velocidade de rotação do mesmo. Neste motor, porém, seria de esperar que a corrente média aplicada fosse praticamente constante, para as diferentes velocidades, enquanto este fosse actuado em vazio. A corrente no motor em vazio varia entre 388 mA e 979 mA, para 400 rpm e 3400 rpm, respectivamente. Embora se verifique o aumento da corrente aplicada ao motor, verifica-se também que, esta pode ser negligenciada quando comparada com a corrente máxima permitida ao mesmo.

Em termos do protocolo de comunicação, usou-se comunicação em ASCII. Assim, o motor é passível de controlo por porta-série. O envio por parte do controlador ocorre naturalmente. Contudo, alguns erros foram reportados na recepção. Pelo que se conseguiu apurar, poder-se-á tratar de um problema de detecção do start bit por parte do microcontrolador. A solução encontrada para este problema passou por enviar cada byte de um comando separadamente.

Relativamente ao interface gráfico criado, foi possível verificar o correcto funcionamento. Porém, dado que se usa comunicação que permite a visualização das diversas variáveis no HyperTerminal, por exemplo, foram reportados alguns problemas aquando de utilização excessiva da porta série. Esses problemas ocorrem essencialmente por problemas associados ao microcontrolador. Estes serão descritos de seguida.

No que diz respeito ao microcontrolador usado, algumas foram as lacunas detectadas ao longo do desenvolvimento do trabalho. Quer por erros presumivelmente derivados do compilador, quer por questões intrínsecos ao microcontrolador. As maiores fontes de problema encontradas prendem-se com problemas de memória e problemas de aritmética.

Os problemas relacionados com a memória estavam relacionados com a quantidade de variáveis que poderiam ser usadas. Em termos aritméticos, verificou-se que as divisões efectuadas possuíam um tempo de execução muito elevado, o que condiciona também a implementação do controlador.

5.2 *Trabalho futuro*

Aquando do desenvolvimento de um sistema, seja ele qual for, efectuem-se sempre algumas opções de modo a melhorar o desempenho do mesmo. Nesse sentido, alguns são os pontos que necessitam de algum melhoramento. O modo de detecção de corrente presente no controlador desenhado é composto, essencialmente, por uma resistência de sensing. Por esse motivo, quanto maior forem as correntes, maiores serão as perdas associadas a este componente. Por

outro lado, dado que uma tensão é criada aos terminais do mesmo, menor potência será entregue ao motor, levando à mesma consequência.

Nesse sentido, e de modo a incrementar a eficiência global do sistema, seria interessante o uso de sensores de corrente mais eficientes. O sensor de corrente de Hall poderá desempenhar este papel. No entanto, o preço do mesmo deverá ser tomado em conta.

Numa outra vertente, seria interessante poder efectuar o controlo da temperatura do motor, dado que, em diversas situações esta pode ser crítica. Este facto, serviria para assegurar que este opera sem riscos de danos por aquecimento em demasia. O controlo de temperatura, pode ser efectuado, por exemplo, embutindo uma sonda PTC, tal como é sugerido pelo fabricante.

A leitura da tensão aplicada ao motor a cada instante, constitui um aspecto importante num controlador deste género. Assim, deveria ser incluído no mesmo um circuito que possa traduzir essa mesma informação. Porém, o microcontrolador usado encontra-se usado integralmente, sendo que seria necessário o uso de um microcontrolador similar.

Neste mesmo contexto, seria interessante alterar o microcontrolador para o dsPIC30F2010. Alguns dos problemas encontrados que derivam directamente do microcontrolador deveriam ser dissipados.

O sistema em questão foi desenhado com o intuito de ser implementado num veículo eléctrico. Nesse sentido, seria interessante implementar um circuito capaz de armazenar a energia recebida aquando de uma travagem.

Devido ao facto de uma pilha de combustível fornecer à sua saída energia eléctrica, é possível que todo o sistema funcione, por exemplo, a uma bateria. De facto, foi dessa forma que foi elaborado o trabalho. Assim, é ainda necessário, aquando do acoplamento deste sistema a uma pilha de combustível, controlar a tensão que esta proporciona à sua saída. Por outro lado, e de acordo com os cálculos efectuados no Anexo I, é necessário implementar ainda um sistema de desmultiplicação mecânica que, por um lado, reduza a velocidade final a aplicar às rodas do veículo, por outro, aumente o binário empregue às mesmas numa mesma proporção. Nesse sentido, seria importante verificar o comportamento do motor quando lhe são acopladas diferentes cargas.

Referências

- Bac2 Conductive Composites, 2009
<http://www.bac2.co.uk/fuel-cell-applications>
- Brown, W., *Brushless DC Motor Control Made Easy*, United States of America, Microchip Technology Inc., 2002
- Engelman, R. H., Middendorf, W. H., *Handbook of Electric Motors*, New York, Marcel Dekker, 1995.
- Fonseca, P., *Sistemas de Instrumentação Electrónica*, Aveiro, 2007.
- Gottlieb, I. M., *Electric Motors and Control Techniques*, United States of America, TAB Books, 1994.
- Heliocentris, 2009
www.heliocentris.com
- Hirschenhofer, J. H., Stauffer, D. B., Engleman, R. R., *Fuel Cell Handbook*, Morgantown Energy Technology Center, 1998
- Horizon Fuel Cell, 2009
www.horizonfuelcell.com
- Lepkowski, J., *Motor Control Sensor Feedback Circuits*, United States of America, Microchip Technology Inc., 2003
- Maxon Motors, 2009
<http://www.maxonmotor.com>
- Melo, A. F., *Sistemas de Controlo II*, Aveiro, 2008
- MOOG Motors, 2009
<http://www.polysci.com>
- National Museum of American History, 2009
<http://americanhistory.si.edu/fuelcells>
- O'Hayre, Ryan; Cha, Suk-Won; Colella, Whitney; Prinz, Fritz B., *Fuel Cell Fundamentals*, 1st edition, New York, John Wiley & Sons, 2006.
- Palma, J.C., *Accionamentos electromecânicos de velocidade variável*, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- Ramos, C. J., *Sistemas de Recuperação de Energia de Deslizamento aplicado ao Aproveitamento da Energia das Ondas Marítimas*, Porto, 1997

Rousseau, A., Sharer, P., *Comparing Apples to Apples: Well-to-Wheel Analysis of Current ICE and Fuel Cell Vehicle Technologies*, Argonne National Laboratory, 2004

Santos, D. G., *Electrotecnia Teórica*, Aveiro, 2006

Sedra, A.S, Smith, K. C., *Microelectronic Circuits*, New York, Oxford University Press, 2004.

Tipler, P. A., Mosca, G., *Physics for Cientists and Engineers*, New York, W. H. Freeman and Co.,2004.

Yedamale, P., *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, United States of America, Microchip Technology Inc., 2003

Datasheet dos componentes usados

Anexo I

projecção das características necessárias ao motor

Pressupostos físicos

Como já foi dito anteriormente, o objectivo geral deste projecto passa pela construção de um veículo automóvel, actuado por um motor eléctrico, que por sua vez é alimentado por uma pilha de combustível. Assim, as características do motor e da pilha de combustível são fulcrais para o correcto funcionamento de todo o sistema. No sentido de se encontrar tais entidades, é necessário partir de algumas condições físicas.

Neste caso, tais condições foram fortemente afectadas pelos requisitos da prova onde o veículo participará, Shell Eco-Marathon.

Assim o pressuposto inicial foi manter o veículo a uma velocidade constante numa inclinação de 10%. Desprezando todas as forças de atrito envolvidas:

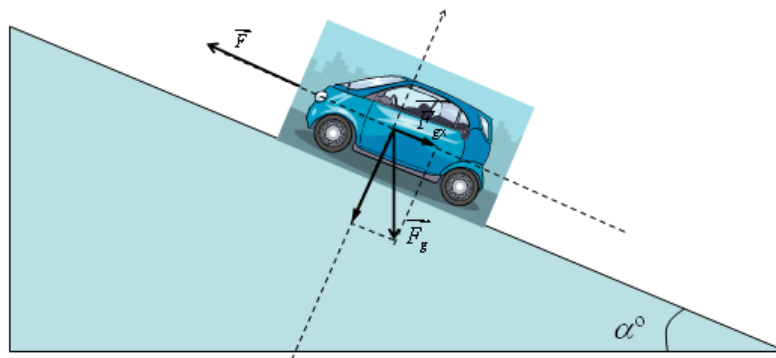


Figura 1: Esquema exemplificativo das condições exigidas.

Usando a segunda lei de Newton

$$\sum F = m.a$$

Neste caso em concreto,

$$F - F_{gx} = m.a$$

Dado que se pretende uma velocidade constante, então a aceleração do carro no momento considerado, será nula. Assim:

$$F - F_{gx} = 0 \Leftrightarrow F = F_{gx},$$

com

$$F_{gx} = F_g \sin(\alpha^o)$$

Como a inclinação pretendida é de cerca de 10%, então

$$\sin(\alpha^o) = 0.1.$$

No que diz respeito à força gravítica, sabe-se que depende da massa do corpo e da aceleração da gravidade,

$$F_g = m \cdot g .$$

Considerando um valor para a aceleração da gravidade de $g = 9.8m.s^{-2}$ e assumindo uma massa final do veículo a rondar os $m=120$ Kg, obtém-se uma força gravítica de $F_g \cong 1200N$.

Assim,

$$F_{gx} = F_g \sin(\alpha^\circ) \Leftrightarrow F_{gx} = 1200 \cdot 0.1 = 120N .$$

Assim, caso desejemos que o veículo se mantenha a uma velocidade constante numa inclinação de 10%, será necessário fornecer uma força de $F=120N$ ¹.

A força entretanto calculada terá que ser exercida pelo motor. No entanto, esta força é exercida pelo motor em termos de Binário. O Binário, na sua forma vectorial, é dado por:

$$B = \vec{R} \times \vec{F} ,$$

F o vector da força aplicada e R o vector da distancia entre o ponto de aplicação da força e do ponto de origem do binário. Na forma escalar esta expressão torna-se mais simpática,

$$B = R \cdot F \cdot \sin(\beta^\circ)$$

De uma forma simples, se verifica que o binário produzido pelo motor, é impelido nas rodas provocando uma força. A força produzida será sempre perpendicular ao raio das rodas do veículo. Sabendo que as rodas do veículo têm um raio de $r \cong 25cm$, obtém-se assim o valor do binário necessário ao motor, ou seja,

$$B = R \cdot F \cdot \sin(\beta^\circ) \Leftrightarrow B = 0.25 \cdot 120 \cdot \sin(90^\circ) \Leftrightarrow B = 30Nm .$$

Nas condições iniciais, verifica-se que o veículo mantém a velocidade. No entanto, até este momento ainda não se introduziu a variável de velocidade. Assim, desta feita, pretende-se que a velocidade mantida seja de $V = 25Km/h \cong 6.95m/s$.

Esta velocidade actuada nas rodas, implica uma velocidade angular de cerca de

$$W = \frac{V}{R} \Rightarrow W \cong 27.8rad/s$$

Ou, numa unidade mais perceptível, $W \cong 265rpm$ nas rodas.

Assim, nas rodas do veículo e mediante as condições anteriores, o veículo tem que impor um binário de $B = 30Nm$ a uma velocidade de $W \cong 265rpm$.

Redução

No que diz respeito ao motor, este é geralmente bem especificado usando para tal o seu gráfico característico que nos mostra o binário em função da rotação, ou vice-versa. No entanto, os valores até agora obtidos, apenas dizem respeito à

¹ É de alertar para o facto de a velocidade não depender da força exercida. Idealmente poderíamos obter qualquer velocidade. Tal acontece por não se ter entrado em conta com a força de atrito dinâmico.

roda do veículo. Torna-se assim necessário introduzir um novo conceito, o conceito de redução ou desmultiplicação. Este factor é geralmente associado ao uso de uma caixa que proporciona o funcionamento do motor e rodas a diferentes velocidades. Como possível vantagem, o facto de que o que se perde em velocidade, ganha-se em binário.

Exemplo:

Um motor apresenta como principais características uma velocidade máxima de 8000 rpm assim como um binário de 2Nm a 4000rpm. Sabendo que se pretende uma velocidade máxima na roda de cerca de 800 rpm, determinar o factor de redução a usar, assim como o binário produzido na roda a 400 rpm.

Resolução:

Sabendo que a velocidade máxima do motor é de cerca de 8000rpm, e que se pretende uma velocidade máxima na roda de 800 rpm, o factor de redução será de:

$$FR = \frac{8000}{800} = 10 : 1$$

Assim, usando este factor de redução, sabe-se que quando a roda apresenta uma velocidade de 400 rpm o motor terá uma rotação de $V = 400 \cdot 10 = 4000rpm$. Nesta rotação (4000 rpm), o motor produz um binário de 2 Nm. No entanto o binário produzido na roda será de $B_{roda} = B_{motor} \cdot FR$, o mesmo será dizer que o binário produzido na roda será de $B_{roda} = 20Nm$.

No caso anterior verifica-se que, embora se perca velocidade do motor para a roda, ganha-se, no entanto, binário num mesmo factor.

Assim, a escolha de um motor, vai depender não só das suas características assim como da redução escolhida.

Potência

No que diz respeito à potência, esta é dada por:

$$P = B \cdot W$$

Assim, e no pior caso, a potência que o motor tem que ser capaz de entregar ao veículo é de:

$$P = 30 \cdot 27.8 \Leftrightarrow P = 834W$$

No entanto, será necessário não esquecer a fonte primária de alimentação. Como neste caso, será uma pilha de combustível, é razoável pensar que a tensão

a alimentar o motor poderá estar entre [20;30] V. Este aspecto, restringe, à partida os motores admissíveis. Tal facto, leva a que a corrente máxima, neste caso não deverá ultrapassar os 50A. Este factor será também determinante para a escolha do motor.

Motor Seleccionado

Relativamente ao motor seleccionado, apresenta-se, de seguida, uma tabela com as suas principais características.

Motor Data		
Values at nominal voltage		
1	Nominal voltage	V 24.0
2	No load speed	rpm 5250
3	No load current	mA 435
4	Nominal speed	rpm 4520
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm 310
6	Nominal current (max. continuous current)	A 7.47
7	Stall torque	mNm 2420
8	Starting current	A 55.8
9	Max. efficiency	% 84
Characteristics		
10	Terminal resistance phase to phase	Ω 0.430
11	Terminal inductance phase to phase	mH 0.170
12	Torque constant	mNm / A 43.3
13	Speed constant	rpm / V 221
14	Speed / torque gradient	rpm / mNm 2.19
15	Mechanical time constant	ms 4.80
16	Rotor inertia	gcm ² 209

Tabela 1: Valores nominais do motor. (Fonte: Maxon Motor)

Pretende-se que o veículo atinja uma velocidade máxima de 50 Km/h. dado que as rodas usadas apresentam cerca de 25 cm de raio, então o mesmo será dizer que a velocidade máxima do veículo deverá ser 530 rpm. Sabendo que a velocidade máxima proporcionada pelo motor é de 5250 rpm, então a

desmultiplicação a usar deverá ser de $FR = \frac{5250}{530} \cong 10:1$.

Motor de Testes

Aquando da realização dos testes o motor supracitado não estava disponível devido a avaria. Por esse motivo, os testes foram realizados com um outro motor. As características principais desse motor são descritas na tabela seguinte.

PERFORMANCE AT 25°C				
PARAMETER	SYMBOL	UNITS	TOLERANCE	VALUE
TERMINAL VOLTAGE	V	Volts DC	Nominal	12
PEAK TORQUE	T _P	oz-in	Maximum	334
CONTINUOUS STALL TORQUE	T _C ¹	oz-in	Maximum	44
NO LOAD SPEED	S _{NL}	rpm	Nominal	3400
RATED SPEED	S _R	rpm		2900
RATED TORQUE		oz-in	Maximum	40
RATED CURRENT		Amps		8.8
RATED POWER		Watts		86
TORQUE SENSITIVITY	K _T	oz-in/Amp	±10%	4.75
BEMF CONSTANT	K _E	Volts/Krpm	±10%	3.51
TERMINAL RESISTANCE	R _M	Ohms	±12%	0.17
TERMINAL INDUCTANCE	L _M	mH	±30%	0.146
MOTOR CONSTANT	K _M	oz-in/√ Watts	Nominal	12.8
ROTOR INERTIA	J _M	(oz-in-sec ²)X10 ⁻³	Nominal	0.99
WEIGHT		oz	Nominal	15.0

Tabela 2 – Valores nominais do motor usado para efectuar os diversos testes. (Fonte: MOOG Motor)

Anexo II

Influência das constantes do compensador PID

Na tabela seguinte, Tabela 1, apresenta-se a acção de cada uma das constantes usadas num compensador PID, ou um dos seus variantes.

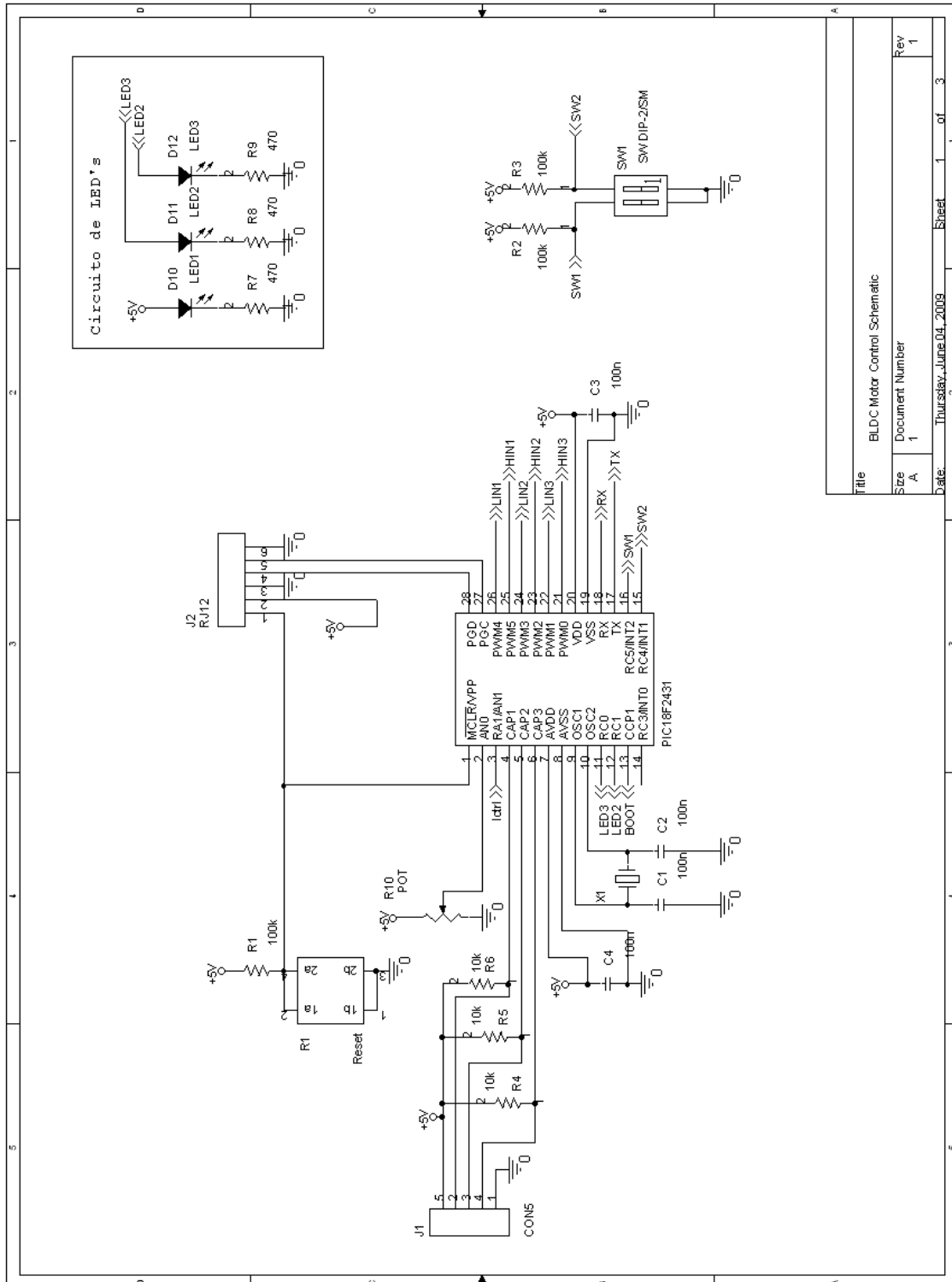
Resposta degrau	ao	<i>Tempo de Crescimento</i>	<i>Sobre- elevação</i>	<i>Tempo de Estabelecimento</i>	<i>Erro em regime estacionário</i>
Aumentando K_P		Diminui	Aumenta	Pequena Variação	Diminui
Aumentando K_I		Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
Aumentando K_D		Pequena Variação	Diminui	Diminui	Pequena Variação

Tabela 1: Efeito provocado pelas diversas constantes de um compensador PID no sistema.
(Fonte: Melo, A.F., 2008)

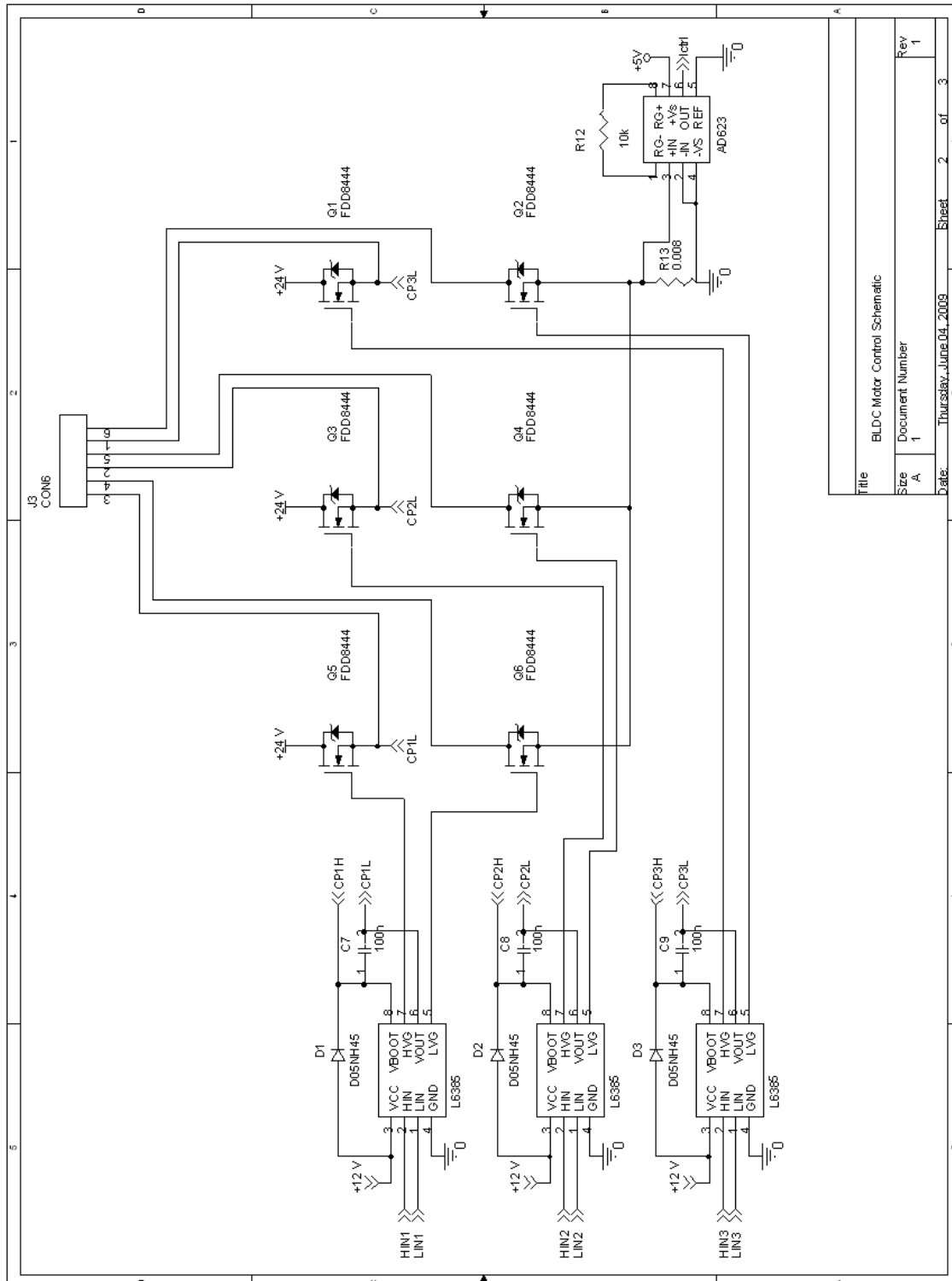
Anexo III

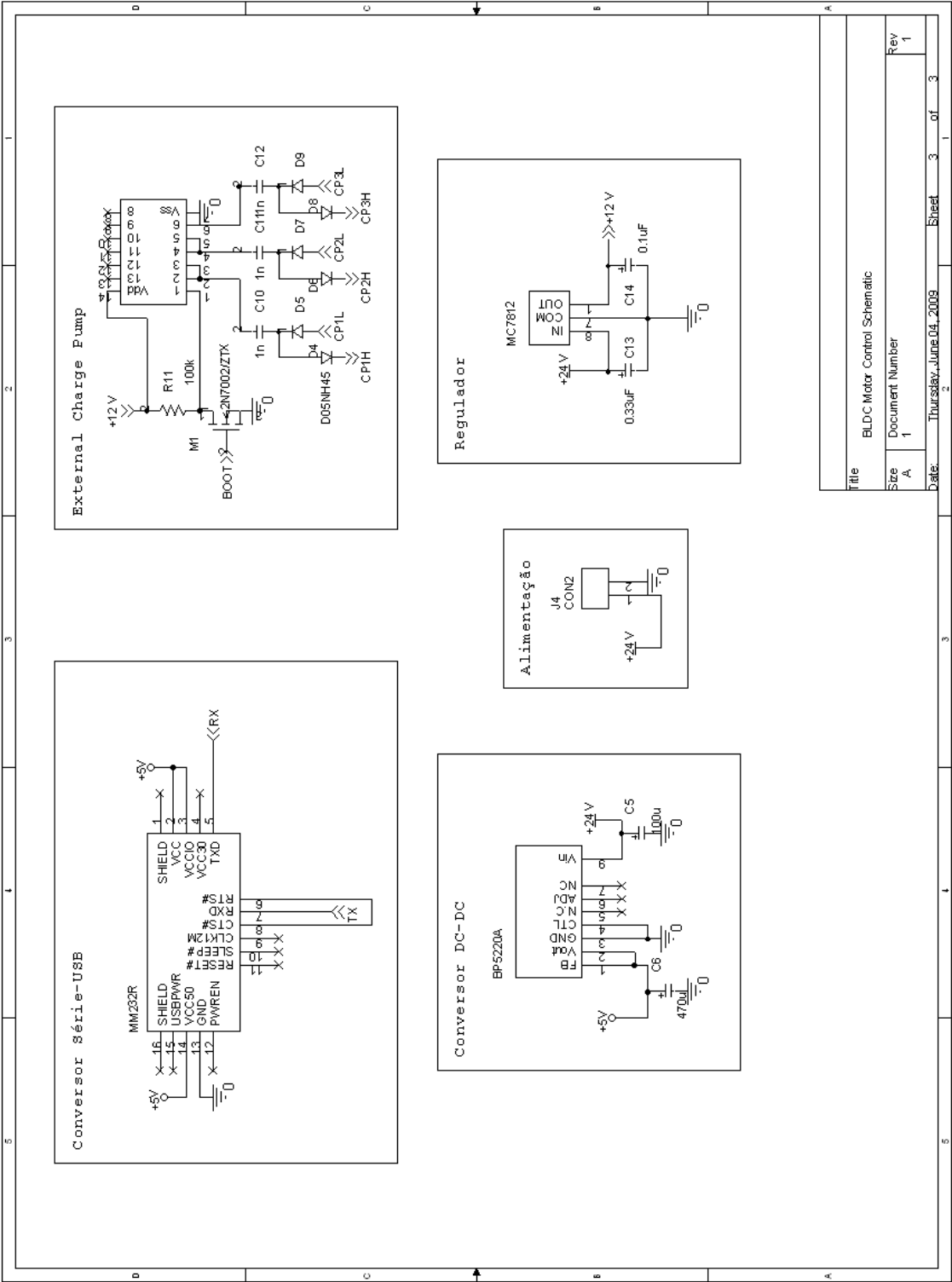
Esquemático global do controlador

Este anexo apresenta o esquemático global do controlador implementado.



Title		BLDC Motor Control Schematic	
Size	A	Document Number	1
Rev	1	Sheet	1 of 3
Date:	Thursday, June 04, 2009	Sheet	1 of 3





Anexo IV

Placa de Circuito Impresso criada

As figuras seguintes mostram o aspecto da Placa de Circuito Impresso criado. Este possui duas camadas, Camada superior (Top) e Camada Inferior (Bottom). Na Figura 1 apresenta-se, também, o tamanho da Placa, em *mm*.

Camada Superior (Top)

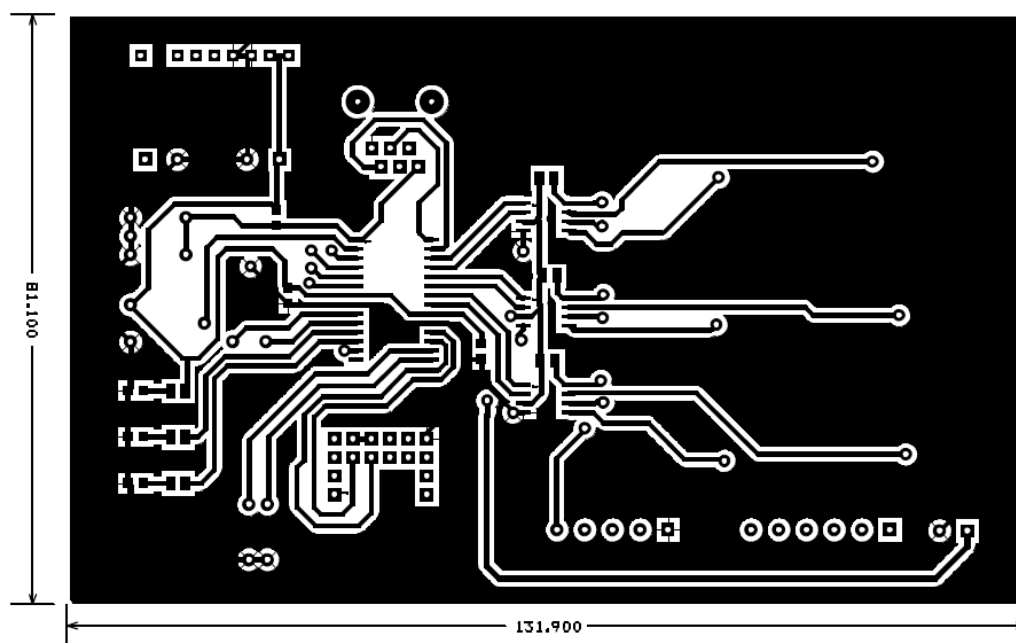


Figura 1 – Vista da camada Top do PCB criado, com dimensões especificadas, em *mm*.

Camada Inferior (Bottom)

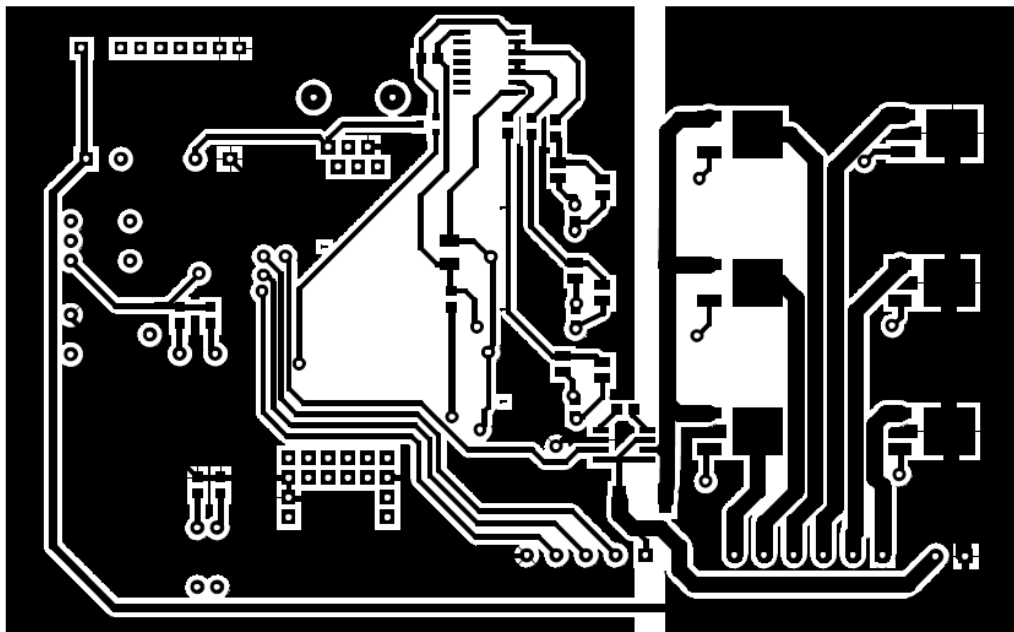


Figura 1 – Vista da camada Bottom do PCB criado.

Anexo V

Ligações efectuadas no controlador

Neste anexo mostra-se as ligações efectuadas em cada conector usado no controlador.

Conector das sondas de Hall

A Figura 1 mostra as ligações efectuadas neste conector. Os extremos representam os sinais de alimentação do circuito das sondas de Hall, enquanto que os sinais intermédios representam os sinais provenientes das diferentes sondas de Hall.

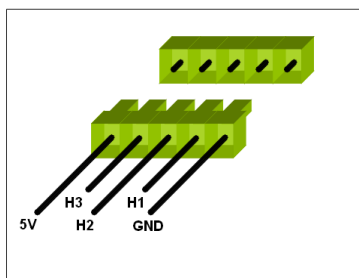


Figura 1 – Ligações efectuadas com cabos provenientes das sondas de Hall do motor.

Conector de ligação aos enrolamentos do motor

O motor possui apenas três enrolamentos. No entanto, optou-se, propositadamente, por usar um conector de seis entradas, de modo a se poder separar as correntes provenientes de cada MOSFET. Assim, na Figura 2 apresentam-se as ligações efectuadas neste conector.

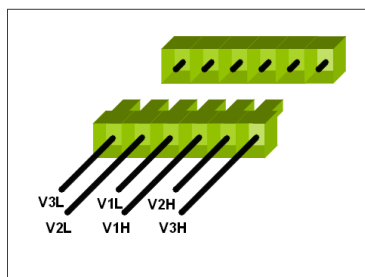


Figura 2 – Ligações efectuadas com cabos provenientes dos enrolamentos do motor.

Conector de alimentação

A Figura mostra as ligações efectuadas neste conector.

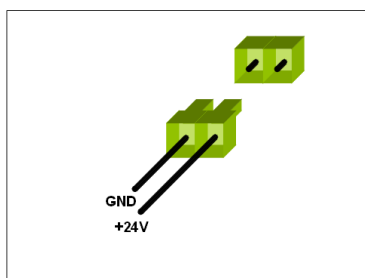


Figura 3 – Ligação dos cabos de alimentação.

Anexo VI

Lista de comandos para controlo por porta-série

Pedido de sincronização

Comando que permite verificar estado do sincronismo entre os dois dispositivos.

Dispositivo: A%#
Controlador: A#

Pedido da velocidade de referência

Pedido, por parte do Master, da velocidade de referência presente no controlador, em rpm.

Dispositivo: B%#
Controlador: [D0] #

Notas: O bloco de dados contém 7 bytes.

Pedido do estado on/off e direcção

O Master efectua o pedido e o controlador responde com dois blocos de dados. O primeiro é referente ao estado on/off e o segundo à direcção.

PC: C%#
Controlador: [D1][D0] #

Notas: Cada bloco de dados é composto por 3 bytes.

ON - '1', OFF - '0'

Direcção: Forward - '1', Reverse - '0'

Pedido da velocidade instantânea

Pedido pelo Master da velocidade a que o motor está a rodar, sendo que esse valor é enviado pelo controlador em rpm.

PC: D%#
Controlador: [D0] #

Notas: O bloco de dados contém 7 bytes.

Pedido da corrente no motor

Corrente no motor enviada pelo Slave em Ampére.

PC: E%#
Controlador: [D0] #

Notas: O bloco de dados contém 7 bytes.

Pedido dos parâmetros do controlador

Enviados pela seguinte ordem: Estado ON/OFF, Direcção, Velocidade de referência, Corrente no motor, Velocidade instantânea.

PC: F%#
Controlador: [D4] [D3] [D2] [D1] [D0] #

Notas: D4 e D3 contêm 3 bytes.

D2, D1 e D0 contêm 7 bytes.

As unidades dos valores enviados são às usadas aquando do envio de cada variável separadamente.

Activar controlro por porta-série

Pedido de controlro do estado do motor através de porta-série.

PC: G%#
Controlador: G #

Notas: Inicialmente, são mantidos os valores das variáveis de controlro presentes na altura no controlador.

Desactivar controlro por porta-série

Pedido de desactivação do controlro do estado do motor através de porta-série.

PC: F%#
Controlador: F #

Notas: Motor passa a ser controlado pelas variáveis presentes no próprio controlador.

Controlro da velocidade de referência por porta-série

Envio do novo valor de velocidade de referência

PC: I [D0] #
Controlador: I # / I %

Notas: No campo de dados é enviado um valor em ASCII. Valores válidos entre 32 e 122 (decimal).

Caso o controlro por porta-série esteja activo, o controlador responde com I #, caso contrário, a resposta será I %.

Controlo do estado ON/OFF do motor por porta-série

Envio do estado ON/OFF do motor. Valores permitidos para D0: '0' e '1';

PC: J [D0] #
Controlador: J # / J %

Notas: '0' corresponde a OFF e '1' a ON.

Controlo por porta-série deverá estar activo. Caso contrário a resposta do controlador será J%.

Se D0 for um valor válido, a resposta será J #, caso contrário será J %.

Controlo da direcção do motor por porta-série

Envio do novo estado para a direcção do motor. Valores permitidos para D0: '0' e '1';

PC: K [D0] #
Controlador: K # / K%

Notas: '0' corresponde a Foward e '1' Reverse.

Controlo por porta-série deverá estar activo. Caso contrário a resposta do controlador será K%.

Se D0 for um valor válido, a resposta será K#, caso contrário será K%.

Alteração do Baudrate da comunicação série

Ordem de alteração do Baudrate do controlador. Valores permitidos para D0: '0', '1', '2' e '3'.

PC: L [D0] #
Controlador: L # / L%

Notas: '0' corresponde a um Baudrate de 9600;

'1' corresponde a um Baudrate de 19200;

'2' corresponde a um Baudrate de 57600;

'3' corresponde a um Baudrate de 115200;

Se D0 for um valor válido, a resposta será L#, caso contrário será L%.

Controlo da velocidade do motor por porta-série

Como já foi dito, o controlo da velocidade por porta-série, implica que se envie no comando a velocidade de referência. A estrutura do comando usado encontra-se representada de seguida.

Controlo da velocidade de referência por porta-série

PC: I [D0] #
Controlador: I # / I %

Usando este comando é possível controlar a velocidade do motor. O campo de dados [D0] é enviado em ASCII, numa variável com 1 byte (8 bits).

Dado que se pretende uma gama alargada de velocidades, são apresentados, de seguida, todos valores possíveis para o campo de dados, assim como a sua relação com a velocidade de referência. Será de salientar que a velocidade de referência vem referida em termos de percentagem da velocidade máxima $V_{max}=3400$ rpm.

<i>Decimal</i>	<i>Campo de dados [D0]</i>	<i>Vel (%)</i>	<i>Decimal</i>	<i>Campo de dados [D0]</i>	<i>Vel (%)</i>	<i>Decimal</i>	<i>Campo de dados [D0]</i>	<i>Vel (%)</i>
32	<i>Espaço</i>	10	47	/	25	62	>	40
33	!	11	48	0	26	63	?	41
34	"	12	49	1	27	64	@	42
35	#	13	50	2	28	65	A	43
36	\$	14	51	3	29	66	B	44
37	%	15	52	4	30	67	C	45
38	&	16	53	5	31	68	D	46
39	'	17	54	6	32	69	E	47
40	(	18	55	7	33	70	F	48
41	)	19	56	8	34	71	G	49
42	*	20	57	9	35	72	H	50
43	+	21	58	:	36	73	I	51
44	'	22	59	;	37	74	J	52
45	-	23	60	<	38	75	K	53
46	.	24	61	=	39	76	L	54

<i>Decimal</i>	<i>Campo de dados [D0]</i>	<i>Vel (%)</i>	<i>Decimal</i>	<i>Campo de dados [D0]</i>	<i>Vel (%)</i>	<i>Decimal</i>	<i>Campo de dados [D0]</i>	<i>Vel (%)</i>
77	M	55	93	J	71	109	m	87
78	N	56	94	^	72	110	n	88
79	O	57	95	—	73	111	o	89
80	P	58	96	`	74	112	p	90
81	Q	59	97	a	75	113	q	91
82	R	60	98	b	76	114	r	92
83	S	61	99	c	77	115	s	93
84	T	62	100	d	78	116	t	94
85	U	63	101	e	79	117	u	95
86	V	64	102	f	80	118	v	96
87	W	65	103	g	81	119	w	97
88	X	66	104	h	82	120	x	98
89	Y	67	105	i	83	121	y	99
90	Z	68	106	j	84	122	z	100
91	[	69	107	k	85			
92	\	70	108	l	86			

Tabela 1 – Relação entre o campo de dados enviado no comando e velocidade de referência que actua no motor.